

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	楽器演奏に伴う脳血流量の変化についての研究
Title(English)	
著者(和文)	川崎愛
Author(English)	Ai Kawasaki
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12492号, 授与年月日:2023年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:高橋 将記,室田 真男,佐久間 邦弘,駒田 陽子,永岑 光恵,林 直亨
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12492号, Conferred date:2023/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学審査学位論文
博士（社会・人間科学コース）

楽器演奏に伴う脳血流量の変化
についての研究

2023年3月

東京工業大学 環境・社会理工学院 社会・人間科学系

川崎 愛

KAWASAKI, AI

研究指導教員：高橋 将記 准教授

論文要旨

「楽器演奏に伴う脳血流量の変化についての研究」と題した本論文は、3つの研究成果をまとめたものであり、以下に示す7章から構成される。

【第1章 序論】

楽器演奏に伴い、脳の多数の領域が賦活することが、PET や fMRI を用いた多数の先行研究によって報告されている。これは賦活した脳領域における血流量の相対的な増加を反映する。ただし、先行研究では相対値が用いられていることから、楽器演奏時に脳血流速度や脳血流量の絶対値が増加するかを判断することはできない。一方、自転車などの身体運動に伴い、絶対値として計測可能な中大脳動脈血流量が一過性に増加することが多数の先行研究によって報告されている。この一過性の増加が積み重なった結果、運動習慣を有する者は安静時の脳血流量が高いことも知られている。楽器演奏は身体運動に比較して小さな筋の活動を用いる低い強度の運動ながらも、複雑な筋活動を含むので、楽器演奏に伴い、中大脳動脈血流量が増加する可能性がある。そこで、本論文では、①楽器演奏が脳血流量に与える影響を検討することを目的とした。また、楽器演奏には、視覚、運動、聴覚を高速で交互に処理する高度なスキルが必要である。この視覚、運動、聴覚は楽器演奏の中で読譜、演奏動作、聴音という行動に相当する。本論文では、上記の目的に加え、②楽器演奏中の行動である読譜、演奏動作、聴音のいずれが、中大脳動脈血流速度の変化に関与するのかについて検討することであった。

【第2章 先行研究の考証】

楽器演奏における読譜、演奏動作、聴音の特徴をまとめた。そして、楽器演奏が脳血流量に与える影響について明らかにするため、ヒトが音楽を知覚するメカニズムおよび関連する脳領域についてまとめた。次に、脳血流量に

影響を及ぼす生理的要因についてまとめた。最後に、脳血流の計測の方法論について整理し、本研究で使用した経頭蓋超音波ドップラー（TCD）血流計測装置を用いた脳血流量の計測結果について先行研究の考証を行った。様々な生理的条件下において、中大脳動脈血流速度を血流量として扱うことが適切であることが報告されているので、本稿では中大脳動脈血流量として記した。

【第3章 楽器演奏が中大脳動脈の血流に与える影響】

楽器演奏が中大脳動脈血流に与える影響について検討した。楽器演奏者 13 名に、難度の異なる曲を 3 種類、すなわち初見の曲、習得中の曲、得意な曲をそれぞれ 10 分間ランダムな順序で演奏させた。演奏開始 10 分前から演奏終了 10 分後までの中大脳動脈血流速度を、TCD 血流計測装置を用いて連続的に記録した。演奏直前、演奏中および演奏 10 分後の平均血圧を計測した。その結果、得意な曲以外の演奏時には中大脳動脈血流量および平均血圧ともに有意な増加もしくは増加する傾向を示した。これらの結果から、楽器演奏は中大脳動脈血流量を増加させ、この血流量の増加は演奏の難易度に影響されることが示唆された。

【第4章 楽器演奏に伴う読譜が脳血流に与える影響】

第3章の楽器演奏に伴う脳血流量の増加が、演奏時に必要な読譜、演奏動作および、聴音のいずれに伴うものかを明らかにするため、読譜が中大脳動脈血流量に与える影響を検討した。楽器演奏者 17 名に、楽譜を見ながらの演奏、暗譜での演奏、および読譜を各 10 分間ランダムな順序で行わせた。演奏開始 10 分前から演奏終了 10 分後まで中大脳動脈血流量を連続的に記録した。演奏直前、演奏中および演奏 10 分後に平均血圧を計測した。その結果、楽譜を見ながらの演奏、暗譜での演奏、および読譜に伴い中大脳動脈血

流量が有意に増加した。演奏終了後には演奏前の値と有意差のない水準に戻った。読譜および、読譜以外の演奏に必要な行動ともに中大脳動脈脳血流量の増加に関与することが示唆された。

【第 5 章 音楽の聴取が脳血流に与える影響】

第 3 章および第 4 章の研究結果により、楽器演奏、読譜に伴い中大脳動脈血流量が増加することが示された。本章では、聴音の影響を明らかにするため、音楽の聴取が中大脳動脈血流量に与える影響について楽器演奏者と非楽器演奏者を対象にして検討した。健常成人の音楽家と非音楽家 24 名に、映画楽曲を長調と短調に編曲した楽曲を各 10 分間ランダムな順序で聴取させた。音楽聴取の 10 分前から 10 分後まで中大脳動脈血流量を連続的に記録した。その結果、長調と短調のいずれの音楽聴取に伴っても中大脳動脈血流量は有意に増加した。長調と短調との間に有意差はなかった。また、音楽家と非音楽家の中大脳動脈血流量の増加の程度に有意差はなかった。音楽の聴取は中大脳動脈脳血流量を増加させることが示唆された。

【第 6 章 追加実験】

第 5 章まで研究により、楽器演奏中におこる脳の血流増加は、楽器演奏に伴う読譜、演奏動作、聴音それぞれが要因であることが明らかとなった。ただし、脳血流の増加が、音楽演奏独自の応答なのか、視覚、聴覚、筋活動それぞれの応答が統合されたものなのかは不明であるため、類似の刺激を用いて追加実験を行った。その結果、音楽刺激は、音楽に類似する刺激よりもの中大脳動脈の血流量の増加に貢献する可能性が高いと考えられた。

【第 7 章 結論】

一過性の楽器演奏により中大脳動脈血流量は増加することが示唆された。研究 1 と研究 2 の結果から、増加の程度は 5~12%であった。身体運動と楽

器演奏とでは強度が異なるので、適切な比較は難しいものの、中程度強度の身体運動時の中大脳動脈血流量が 20%程度増加することと比較しても、相応の変化を示すことが明らかになった。また、楽器演奏中の中大脳動脈血流量の変化は楽器演奏時の行動である、読譜、演奏動作、聴音が要因であることが明らかとなった。

本研究の知見は、楽器演奏中の脳血流の応答やそれを起こす要因を明らかにしたものである。本研究の限界は、ピアノとヴァイオリンの2種類の楽器に限定されていることである。また、身体運動と異なり、演奏の負荷を統制できない点は方法的な限界である。本研究成果は、演奏習慣を有する者の脳血流量の特徴の解明の糸口を与えたものであり、楽器演奏や音楽の聴取が脳血流を維持することに貢献するかを検討するための基礎的研究である。

目次

略語一覧

第1章 序論

- 1. 1 緒言
- 1. 2 本研究の目的と意義

第2章 先行研究の考証

- 2. 1 楽器演奏における読譜、演奏動作、聴音
 - 2. 1. 1 【読譜】読譜とは
 - 2. 1. 2 読譜と読書について
 - 2. 1. 3 読譜と読書における脳活動の差異
 - 2. 1. 4 【演奏動作】楽器演奏という身体活動の特徴
 - 2. 1. 5 音楽家は楽譜の指示を正確に再現する
 - 2. 1. 6 【聴音】音楽の構成要素
 - 2. 1. 7 音の情報が処理されるプロセス
 - 2. 1. 8 失音楽症と失語症の症例からみる音楽と言語の処理の差異
 - 2. 1. 9 音楽を知覚するメカニズム
 - 2. 1. 10 音楽処理に関連する主な脳領域
- 2. 2 中大脳動脈について
- 2. 3 脳血流に影響を及ぼす生理的因子
 - 2. 3. 1 動脈血中二酸化炭素分圧が脳血流に及ぼす影響

2. 2. 2 血圧の脳血流への影響

2. 4 脳の代謝的変化の計測手法

2. 5 本論文の構成と各章の目的

第3章 楽器演奏が中大脳動脈の血流に与える影響（研究1）

3. 1 背景と目的

3. 2 方法

3. 3 結果

3. 4 考察

3. 5 まとめ

第4章：楽器演奏に伴う読譜が脳血流と認知機能に与える影響（研究2）

4. 1 背景と目的

4. 2 方法

4. 3 結果

4. 4 考察

4. 5 まとめ

第5章：音楽の聴取が脳血流に与える影響

5. 1 背景と目的

5. 2 方法

5. 3 結果

5. 4 考察

5. 5 まとめ

第 6 章 追加実験

第 7 章 結論

7. 1 総合討論

7. 2 研究の限界

7. 3 今後の展望

参考文献

研究業績

謝辞

略語一覧

BP (Blood pressure) : 血圧

CBF (cerebral blood flow) : 脳血流

CI (conductance index) : 血管コンダクタンス

CO₂ (carbon dioxide) : 二酸化炭素

fMRI (functional magnetic resonance imaging) : 機能的磁気共鳴画像法

FS (play for the first time) : 初めて演奏する

MAP (mean arterial pressure) : 平均血圧

MCA (middle cerebral artery) : 中大脳動脈

MCAv (middle cerebral artery blood velocity) : 中大脳動脈の血流速度

MS (already mastered) : 得意な曲の演奏

NIRS (near infra-red spectroscopy) : 近赤外分光計測

PaO₂ (partial pressure of arterial oxygen) : 動脈血酸素分圧

PaCO₂ (partial pressure of arterial CO₂) : 動脈血CO₂分圧

PET (positron emission tomography) : 陽電子放出断層撮影

PETCO₂ (end-tidal-partial pressure of CO₂) : 呼気終末 CO₂ 分圧

PR (music in practice) : 練習中の楽曲

TCD (transcranial doppler ultrasonography) : 経頭蓋ドップラー

VO₂ (oxygen uptake) : 酸素摂取量

V_E (minute ventilation) : 換気量

PL60 (play eighth notes at a tempo of 60) : 8 分音符が 60 のテンポで演奏

PL80 (play eighth notes at a tempo of 80) : 8 分音符が 80 のテンポで演奏

RE60 (reading score eighth notes at a tempo of 60) : 8 分音符が 60 のテンポで
読譜

RE80 (reading score eighth notes at a tempo of 80) : 8 分音符が 80 のテンポで
読譜

ME80 (play eighth notes at a tempo of 80 based on memory without looking at
the score) : 8 分音符が 80 のテンポで暗譜による演奏

第 1 章 序論

1. 1 緒言

楽器演奏は、演奏という身体活動（演奏動作）、楽譜を読解するという視覚情報処理（読譜）、自分の演奏を聴きながら音の正確性を保持（聴音）することを同時に行う複雑な活動である。楽器の習得には、視覚、運動感覚、聴覚を高速で交互に処理する高度なスキルを必要とする (Bangert et al., 2006b; Musacchia et al., 2007; Lappe et al., 2008; Pantev et al., 2009; Lee & Noppeney, 2011)。

一過性の楽器演奏により、中大脳動脈の血流速度 (MCA_v) が増加する可能性がある。一過性の自転車運動のような身体活動に伴って MCA_v は増加する (Sato et al., 2011)。この増加は最大強度時を除き強度に依存する。楽器演奏に伴う演奏動作は、低強度で小さな筋群しか使わない一方、複雑な筋活動と情報処理が要求される (Furuya et al., 2011)。楽器演奏に伴って MCA_v が増加するのか否かはこれまで明らかにされてこなかった。

fMRI や PET を用いた研究では、楽器演奏に多くの脳領域が関与していることが示唆されている (Zatorre et al., 2007)。これは、活性化した脳領域が、それ以外の領域と比べ相対的に血流が増加することを示していることから、楽器演奏に伴って MCA_v が増加する可能性がある。ただし、fMRI や PET の測定では、活性化する脳の血流変化を相対的に評価しているものの、血流の絶対的な変化は評価されていない。従って、楽器演奏が脳血流 (CBF) に及ぼす影響は不明である。

MCA_v は血流速度のみを計測しているものの、生理的条件下では血管径に変化がない (Querido & Sheel, 2007) ので、CBF の指標となる。MCA_v は

経頭蓋ドップラー（TCD）血流計によって測定可能である。TCDは高いサンプリングレートで、ヒトの中大脳動脈（MCA）などの脳内の大動脈の血流速度の絶対変化を評価する非侵襲的な方法であり (Fantini et al., 2016; Robba et al., 2018), 安価で安全性が高い (Narayan et al., 2018). TCDによって測定された CBF は、全脳の CBF の変化を反映する (Deppe et al., 2004).

これらのことから、TCD は楽器演奏の実験研究に適している。TCD を使用することにより、被験者は通常の演奏環境に近い条件下で研究に参加できる。PET と fMRI は、楽器演奏の実験に不向きな点がある。まず、PET と fMRI 内には磁性体を持ち込むことができないので、実際の楽器演奏は難しい。次に、これらの測定装置は測定中にノイズを発生するので、演奏者は自分の演奏した音のフィードバックを受けることができない。さらに、被験者は仰臥位になる必要があるので、通常の演奏動作をすることはできない。一方、TCD を用いる際には磁性体の制限はない。測定中に計測機器がノイズを発生しないため、被験者は演奏時に発する自分の音のフィードバックを聴くことができる。姿勢の制限がないので、座位で演奏することができる。TCD は通常の楽器演奏に伴う CBF の反応を反映するという利点を有する。

楽器演奏中の脳血流に影響する因子は、生理的因子と演奏に伴う行動の因子とに分けられる。生理的因子には血圧（BP）と動脈二酸化炭素分圧（ PaCO_2 ）がある。BP および PaCO_2 の一過性の変化に対して CBF は影響を受ける (Ainslie & Duffin, 2021, Ogoh & Tarumi, 2019). CBF には自己調節機構があり、60～150mmHg の範囲では平均血圧（MAP）の変化に対して CBF がほとんど影響を受けない (Lassen 1959). とはいえ、MAP の変動に対する CBF は完全に一定の血行動態を示さない (Panerai, 2008; Tzeng et

al., 2010). PaCO_2 が増加すると血管拡張が起こり, MCAv が増加し, 減少すると血管収縮が起こり, MCAv が減少する (Ainslie & Duffin, 2009; Ogoh & Ainslie, 2009; Sato et al., 2011). これらの報告から, 楽器演奏に伴う CBF の変化を検討するには, BP と PaCO_2 の寄与を併せて検討する必要がある.

前述のように, 演奏は, 読譜, 演奏動作, 聴音に分解することができるので, これら 3 つの要素を本研究では, 演奏に伴う行動の因子と定義した. 読譜, 演奏動作, 聴音といった一連の音楽生成は, 大脳皮質の活性化を反映している (Sergent et al., 1992a). 加えて, ヒトは, 音楽活動を行う際, メロディー (旋律), ハーモニー (和声), リズムなどの音楽の特徴を知覚している. この知覚には, 前下内側前頭前野, 運動前野, 上側頭回前部および後部, 下頭頂葉を含むネットワークが関連する (Janata et al., 2002; Patel 2003). このような報告がありながらも, 楽器演奏に伴う行動のそれぞれが CBF に及ぼす影響は不明である. 楽器演奏により CBF が増加するならば, 読譜, 演奏動作, 聴音, 読むことが相互に作用することで CBF に影響を与えるのか, もしくはそれぞれの行為が CBF に影響を与える一因となるのかを明らかにする必要がある. 本論文では, 読譜, 演奏動作, 聴音が MCAv に及ぼす影響についてそれぞれ検討する.

1. 2 本研究の目的と意義

本論文の目的は, 一過性の楽器演奏に伴う中大脳動脈の血行動態を明らかにするとともに, それに関連する読譜, 演奏動作, 聴音の影響を検討することである. 一過性の運動は中大脳動脈の血流量を増加させる (Jorgensen et al., 1992; Madsen et al., 1993; Brys et al., 2003; Ogoh et al., 2005). この

応答が重畳して、運動習慣を有する者は脳血流量が高い(Ainslie et al., 2008; Bailey et al., 2013). 一方、楽器演奏は小さく複雑な筋活動を伴うため、中大脳動脈の脳血流量が増える可能性がある。

本研究で検討できる範囲ではないものの、一過性の楽器演奏により脳血流量が増えるならば、音楽習慣を有するものも運動の効果と同様に、脳血流量が高いという知見に結び付くことが期待される。

加齢に伴う脳血流量の減少を抑制することは重要である。加齢に伴って脳血流は減少する (Ainslie et al., 2008)。脳血流の減少は、アルツハイマー病 (Zlokovic et al., 2005)、血管性認知症 (Gorelick et al., 2011) などの認知症疾患と強い関連がある。脳血流を維持することが、認知機能を維持すると示唆されている (Lucas et al., 2012)。現在は、運動でのみ長期的な効果として脳血流量の増加がもたらされることが明らかになっているものの、楽器演奏もこれに加わることができれば、新たな健康維持の手段として提案できるかもしれない。そのためにも一過性の楽器演奏に対する中大脳動脈の血行動態を明らかにすることが必要である。

まとめると、本論文の意義は2つある。1つ目に、TCDでの測定により、通常の演奏に近い状態で、楽器演奏に伴う全脳の血流量の変化を明らかにすることができる。2つ目は一過性の楽器演奏による、脳血流量の変化を明らかにすることで、長期的な効果の研究の基礎となることが期待される。

本論文ではまず、楽器演奏の特徴および楽器演奏が脳に与える影響について報告した先行研究を概説した。また、脳血流に影響を及ぼす生理的要因および脳の代謝的变化の計測手法についても整理した。演奏に伴う脳血流応答の先行研究がわずかであるため、演奏が脳血流に及ぼす影響が明らかでないことがわかった。そこで、楽器演奏中の脳血流の応答を明らかにする3つの

実験研究を行った。

本研究の仮説は、楽器演奏に伴い脳血流が増加し、楽譜を読む、演奏による動作、演奏により発生した音楽を聴取すること、それぞれが、血流が増加する一因となることとした。これらの仮説は、身体活動に伴うMCAvの増加を直接的な根拠とし、演奏に関連した活動に伴う様々な脳領域の活動を間接的な根拠として導き出したものである。

第 2 章 先行研究の考証

楽器演奏では、楽譜を読解するという視覚情報処理（読譜）、演奏という身体活動（演奏動作）、自分の演奏を聴きながら音の正確性を保つ（聴音）を同時に行う。楽器演奏により、脳のいくつかの領域が活性化を示すことは明らかになっている。これらの領域に必要な酸素、栄養素を供給するために脳全体の血流にも影響を及ぼすことが予想される。

本章では、まず、楽器演奏を行うために必要である、読譜、演奏動作、聴音について先行研究の考証を行う。次に、楽器演奏が脳血流量の増加に寄与すると考えられる生理的因子である、動脈血中二酸化炭素分圧（ PaCO_2 ）および血圧（BP）が脳血流に及ぼす影響について先行研究をまとめる。その後、様々な先行研究で用いられている脳機能計測方法および、本研究で使用了超音波ドップラー方について整理する。

2. 1 楽器演奏における読譜、演奏動作、聴音

楽器の演奏には、視覚、運動感覚、聴覚を高速で交互に処理する高度なスキルが必要である (Bangert et al., 2006b; Musacchia et al., 2007; Lappe et al., 2008; Pantev et al., 2009; Lee & Noppeney, 2011)。この視覚、運動感覚、聴覚は読譜、楽器演奏の中で演奏動作、聴音の基盤となる。読譜は、演奏する楽譜の調号や拍子記号に照らし合わせ音符の高さや長さを解釈し、音符のパターンやピッチの正確さを検出し (Peretz & Zatorre, 2005)、音の強さ、滑らかさなど表現の部分を計画して、それぞれの情報を処理する。演奏動作は、演奏する楽器に合わせ、楽譜に書かれた情報を適切な運動に変換しアウトプットする。具体的には、楽譜に音を短く切って演奏するという指示があった場合、ピアノの演奏動作では指が鍵盤を押す時間を短くする。音楽

家が楽譜を読むときには、演奏のために、視覚から運動への変換することが関与している可能性がある (Schön & Besson, 2002; Schön et al., 2002). 聴音は、楽譜の情報を正しくアウトプットしているか、トラッキングしミスを検知する。すなわち、読譜の内容が正しく演奏に反映されているかを、演奏により発生した音を聴くことで確認する。楽器演奏の間、読譜、演奏動作、聴音は継続的に高速で処理されながら、交互に作用し合っている。次項より、読譜 (2.1.1-), 演奏動作 (2.1.4-), 聴音 (2.1.6-) について概観する。

2. 1. 1 【読譜】読譜とは

読譜は演奏に必要な能力である (Palmer, 1997)。特にクラシックの音楽家にとっては、音楽家同士のコミュニケーションを成立させる手段として不可欠なものである (Cook, 1994)。楽譜には作曲者のメッセージがちりばめられており、音楽家はそれを受け取って演奏する。複数の演奏者で演奏する場合にも楽譜の存在は重要な役割を果たしている。読譜をすることで、それぞれの演奏者がどのタイミングで音を出すかを視覚的にとらえることができる。さらに、楽譜を通じ楽曲の構想（テーマ）を共通認識として理解し演奏する。音楽家にとって楽譜は、楽曲の完成度を高める道しるべのようなものである。音楽家が読譜の技術を身に着けることは必要不可欠である。

2. 1. 2 読譜と文章読解の相違

読譜と文章の読解はいずれも読むという同じ目的を果たすものである。このふたつの読むという行為で、読解プロセスが異なるのか否かという議論がこれまで行われてきた (Deloche et al., 1987, Cohen et al., 2000)。

読譜と文章の読み方には共通点がある。横書きの文章において、左から右

に読み進める点が共通である。音楽や言語のそれぞれの要素は無計画に配置されているわけではなく、音楽の調和の規則や言語の構文の規則によって、高次の要素に組み合わされる(Besson & Schön, 2001)。文法または構文とイントネーションに関して多くの類似点がある(Besson & Schön 2001, Patel, 2003)。また、音楽的および言語的シーケンスは、言語における単語、句、文の形成、音楽における和音、和音進行、およびキーの形成など、複数の要素で機能している(Patel, 2003)。

一方、楽譜の読み方には、文章の読み方と異なる点がいくつかある。

まず読む方向である。横書きの文章を読む際には、水平方向に読み進めていく一方、読譜では、水平方向と同時に垂直方向に読み進める。水平方向には主にメロディーが記されている。メロディーは音楽的にまとまりのある一連の音の連なりのことである。垂直方向には主に和音が示されている。音符が垂直方向のどこに位置しているかによって、音の高さが決まる。垂直方向の複数音符を同時に鳴らすことで和音となり、メロディーを支える伴奏の役割をはたす。訓練されたピアニストは音符を一音ずつではなく、ひとつのかたまりで読むことが多く、楽譜を読む際には水平方向と垂直方向を組み合わせる傾向がある(van Galen & Reitsma., 1981)。

次に、文字と文字の間の空白が等間隔であるのとは違い、音符と音符の間隔は音符の長さに依存する。楽譜に示された音符の種類は、音を持続する長さを表す。音符の後には、空白があり空白の間隔は一定ではない。音を長く持続させる音符の後の空白は広く、音を短く持続させる音符の後の空白は狭い。音符の種類と空白の広狭により、瞬時に視覚的に長さを捉えられることができる。

最後に一番大きな違いとして、読譜は厳密な時間規則に従って行われる

(Smith & Jones., 2018). 読書ではわからないところを繰り返して読むことが可能である一方、演奏時の読譜ではこれが許されない。これは、作曲者が意図する音楽を演奏者が再現するために、作曲者自身が曲ごとにテンポを定めているためである。

読譜と文章の読解は読むという同じ目的がある。ところが、読譜は、文章を読むこととは違う活動であり、読譜を読み解くための技術、さらに楽曲の文脈の中で読み解くという技術を必要とする。

2. 1. 3 読譜と読書における脳活動の差異

読譜と読書をする際に脳の活性領域において共通部分と、読譜に特化した部分がある。楽譜の読みと言語の読みの両方の処理に関与する領域は、縁上回、前頭回、上側頭回後部であるが、この領域はすべての被験者が活性化を示すわけではない(Roux et al., 2007)。読譜に特異的な領域は頭頂溝と中側頭回であり(Roux et al., 2007)、視蓋上回は、読譜時にも言語の読書時にも活性化した (Roux et al., 2007, Steward 2003; Steward 2004)。Roux らは、頭頂溝錘状回が活性化し、その後左後頭頂部、前頭部で処理されるネットワークの可能性を示している(Roux et al., 2007)。

脳損傷により読譜障害や失読症を発症した病例から、読譜と読書のプロセスの違いを理解することができる。失読症を発症した患者は音楽能力については損なわれなかった (Brust 1980 ; Assal & Buttet, 1983, Basso & Capitani, 1885 ; Mendez 2001)。これとは逆に、言語読解が保たれ、音楽読解に障害がみられる症例も報告されている (Cappelletti et al.,2000)。脳損傷により、失読症および読譜障害を同時に発症する例もある (Stanzione et al.,1990)。これらの症例からは、読譜と文章の読解の脳領域において一

部共通の部分があるものの、少なくとも完全に一致してはいないことが示唆される。音楽の読み取りと文章の読み取りは機能的に自立し、構造的には神経が隣接している (Hébert & Cuddy, 2006)。読譜と文章の読解は区別して考えるべき活動である。

2. 1. 4 【演奏動作】楽器演奏という身体活動の特徴

楽器演奏における身体活動は、単に鍵盤を押す、弦を押さえるという単純なものとは異なる。例えば、ピアノ演奏による打鍵は、腕を鍵盤に向かって振り下ろすことから始まり、鍵盤の手前側で指先の力を調節して押さえることで終わる (Kinoshita et al., 2007)。ピアノ打鍵でなく、フィンガータッピングにおいても、ピアニストは非ピアニストよりも指の力を正確にコントロールできた (Aoki et al., 2005)。

また、音楽家が楽器演奏する際には、すべての指を正確に早く動かす訓練が必要となる (Kochevitsky 1995; Galamian & Thomas, 2013; Hofmann & Goebel, 2016)。多くの人は、日常生活の中で利き手でない方の手で作業を行う場合、利き手のように器用に動かすことはできないだろう。非利き手で文字を書けば筆圧が下がり、利き手と同じように書くことは難しい。楽器を演奏する音楽家が楽曲を演奏する際には、非利き手であっても利き手と同様に複雑な動きが要求される。どの楽器を演奏する際にも、左右の指が同じ動きをすることはほとんどない。

2. 1. 5 音楽家は楽譜の指示を正確に再現する

楽譜には、作曲者のイメージ通りに演奏者が楽曲を再現できるようにするため、アーティキュレーション（音と音のつながり方や切り方でフレーズを表

情を付けること)や音の強弱の指示が細かくされている。

アーティキュレーション記号により奏法に関する指示がなされる。楽譜の中の音符だけでは説明できない、音と音とを短く切る(スタッカート *staccato*)、十分に音を保つ(テヌート *tenuto*)、鋭く切る(スタッカティッシモ *staccatissimo*)、音同士を切れ目なくなめらかに演奏する(スラー *slur*)など、演奏上での奏法の指示を、アーティキュレーション記号を用いて示す。音楽家はアーティキュレーション記号の指示にしたがって、演奏する指先や腕の力をコントロールする。ピアノの演奏では、移動する指によって鍵盤を叩く(ストラックタッチ)、鍵盤の表面に静止した指によって鍵盤を押す(プレストタッチ)(Goebel et al., 2005)という技巧が用いられる。

アーティキュレーション記号が単体の音もしくは、短いフレーズの奏法に関する指示である一方、強弱記号は広い範囲の指示である。強弱記号は弱く(ピアノ *p*)強く(フォルテ *f*)が基準となり、とても弱く(ピアノッシモ *pp*)、少し強く(メゾフォルテ *mf*)、とても強く(フォルティッシモ *ff*)などの指示や、徐々に強くする(クレッシェンド)、徐々に弱く(ディミヌエンド)というものがある。ピアニストは *p* を 8 N, *mf* を 15 N, *ff* を 50 N の力で打鍵して演奏したという報告がある(Askenfelt & Jansson., 1992)。ピアニストは強弱記号の指示に従って、音の強さに対し打鍵力の調整を行い、強さに差をつけている。作曲者が指示するアーティキュレーションや音の強弱を忠実に再現するためには、腕や指先の力の細やかなコントロールが必要である。そのため、楽器演奏には小さい筋力ながらも複雑な筋活動と情報処理が要求される(Furuya et al., 2011)。これらの技術習得のために少なくとも数年間の鍛錬を必要とする。

2. 1. 6 【聴音】 音楽の構成要素

音楽には基本となる三つの要素があり、それぞれリズム、メロディー、ハーモニーという。メロディーは、通常単音で、音楽的にまとまりのある一連の音の連なりのことである。リズムは、時間の流れのなかで一定の間隔で刻まれる、連続した周期性をもつ運動のことである。また、2つ以上の高さの違う音を重ねた和音といい、その和音の進行等の配置のことをハーモニーという。音楽を構成する要素は、リズム、メロディー、ハーモニーの三要素を基に、主題、調性、拍子、形式、テンポが挙げられる。

本項では、ヒトが音楽の知覚を行う過程と、またその際に活性化する脳領域について fMRI や PET の証拠を整理する。

2. 1. 7 音の情報が処理されるプロセス

音は空気や物体を振動させ耳に届き聞こえるものである。鼓膜に到達した振動は、中耳の耳小骨で増幅され、内耳のリンパを振動させる (Møller 2012)。音の高さは、内耳の中で振動が最も到達する部分によって決定される。音の情報は、蝸牛神経から蝸牛核、下小丘、中脳の内側被蓋体を通して脳幹に入り、側頭葉の一次聴覚野に到達する (Webster 1992 ; Bhatnagar & Korabic., 2014)。

2. 1. 8 失音楽症と失語症の症例からみる音楽と言語の処理の差異

様々な疾病・事故により脳を損傷すると、音楽能力に障害が発生する (Zatorre 1984; Peretz, 1990; Gosselin et al., 2007)。読譜や演奏ができていたにもかかわらず、脳損傷の後、読譜できない、演奏できないなど、多様な音楽能力が損なわれることを失音楽症という。失音楽症(amusia)は、「脳

疾患の結果として起こる，音楽能力の障害もしくは喪失」と定義されている (Benton 1977). また，脳損傷によって生じる言語障害のひとつに失読症 (dyslexia) がある．失読症は，書かれた文字列を正しく読むことが出来ない障害である．失音楽症および失読症の症例から，音楽と言語の処理の差異がみられる．

例えば，脳血管障害で左の側頭部と側頭頭頂部を損傷し，重度の失語症となった作曲家が，失語症であるにも関わらず作曲家としての活動を再開できた．脳損傷の後に発表した作品は，他の音楽家からも評価されている (Luria & Futer, 1965). 他にも，アマチュアのオルガニストが，右脳梗塞の後に失音楽症を発症し演奏が不可能になったが，失語症ではなかった (McFarland & Fortin 1982).

これらの症例にみられる現象は，音楽家のみならず非音楽家にもみられる．患者は中大脳動脈に動脈瘤のクリッピング手術を連続して受け，両側の聴覚皮質に障害を負った．術後少なくとも6年経過した時点で会話は完全に理解できたものの，失音楽症の症状は継続した (Peretz et al., 1994, Peretz et al., 1996, Peretz et al., 1997). 逆に，Godefroy ら, Mendez らの症例では，脳損傷により，言語の認識能力が損なわれる一方で，音楽の認識能力は残った (Godefroy et al., 1995, Mendez, 2001) . また，音楽能力の一部が失われた症例も存在する．音楽トレーニングの経験のない60代女性の症例では，右脳損傷後，ピッチ生成に特定の欠損がみられた．この患者は損傷前と比べリズム生成に関しては変化がなかった (Murayama et al., 2004). 音楽の知覚にエラーを生じた症例の対象者は，音楽経験者のみならず非経験者も含まれる．

失音楽症および失読症の症例は、前述した脳損傷による読譜障害の事例と類似している。つまり、音楽と言語の処理は機能的に一部または大半が独立していると考えられる。

2. 1. 9 音楽を知覚するモデル

音楽障害の研究から得られた知見から、ヒトが音楽を知覚するモデルを考察することができる。音楽と音楽以外の音の羅列を比較した際に、音楽には旋律と、リズムという特徴がある。楽曲の中でリズムは小節という形で区切り、時間的な流れを縮めたり引き伸ばしたりしながら変化している。また、リズムと関連する強拍と弱拍の周期的パターンである拍子がある。ヒトは音楽特有の特徴を知覚して音楽を認識している(Peretz et al., 2003)。

Peretz らは、音楽の知覚とその記憶のモデルを提唱した(Peretz et al., 2003)。音楽を聴くと、メロディーの旋律的ルート（音程の連続的变化で定義）と時間的ルート（持続時間の連続的变化で定義）に沿って処理される。旋律的ルートは聴覚的に入力された音楽の中で何が発生したか、時間的ルートはいつイベントが発生したかを表す。両ルートは音楽解析の構成要素であり、それぞれの出力、あるいは2つが組み合わさって、あらかじめ記憶にストックしてある曲目（レパートリー）に送られる。そして、記憶に保存されている規則に一致するかを確認する。レパートリーの中のある特定の曲の候補を選択することで、親近感が湧き、結果として楽曲の認知につながる。レパートリーにない楽曲は、初めて音楽を提示されたとき、見慣れない音列はまだレパートリーに記憶された心的表現を持たない。このモデルには制限があり、歌詞がある楽曲は考慮せず、単旋律音楽にのみに該当する(Peretz et al., 2003) (図 1)。

2. 1. 10 音楽処理に関連する主な脳領域

音楽に関連する活動は、fMRI や PET の研究により、ヒトの脳の多数の領域が活性化することがわかっている。音楽の三要素の中のメロディーは、低の変化を伴っており、この特定の音の高さのことをピッチという。ピッチの情報は内耳で分割され、最終的に側頭葉の聴覚野で受信される。ピッチの比較には、頭頂葉と前頭葉のネットワークが関与している (Särkämö et al., 2013)。

音楽のリズムの処理には、左半球、特に小脳、大脳基底核、前頭葉が関与する。この回路は、音楽に合わせた動作などを調節する働きをする (Särkämö et al., 2013)。

ハーモニーの知覚には両側頭葉の前部が関与していると考えられる。側頭葉下部と後頭葉の境界領域は、音楽の旋律や伴奏を実現するために働いている (Satoh et al., 2003)。

音楽が時間の進行とともに展開されていくにあたり、継続的に追跡するために、注意記憶や作業記憶が必要である。注意記憶は注意を持続させて、聴覚的な情報を正確に取り込み、記憶する能力であり、作業記憶は、情報を頭の中に一時的に保存しながら情報を処理する能力である。これは、前頭前野、帯状皮質および下頭頂葉に広がる (Zatorre et al., 1994, Janata et al., 2002)。

この他にも、馴染のある音楽を聴くと、海馬、側頭部、頭頂部が活性化される (Platel et al., 2003, Janata et al., 2007)。音楽を聴いたことに伴う感情の変化には、線条体領域、中脳領域、扁桃体、海馬などの辺縁系ネットワークが関与する (Blood et al., 2001, Koelsch 2011)。楽器演奏、歌を歌うなど、音楽の生成には小脳、大脳基底核、運動および体性感覚皮質領域など

感覚運動ネットワークが活性化する(Zatorre et al., 2007, Grahn & Rowe, 2009).

Särkämö らは、上記した先行研究をまとめ、主に音楽を聴いた際の音楽処理が行われる脳の領域を示した(Särkämö et al., 2013) (図 2).

2. 3 中大脳動脈について

本研究のすべての実験で TCD を使用し、MCA_v を測定している. TCD によって測定された CBF は、全脳の CBF の変化を反映している(Deppe et al., 2004).

正常な成人における中大脳動脈(MCA)の平均脳血流量は、通常、脳組織重量 100g あたり毎分 50~60ml の範囲である. ただしこの値は年齢、性別、健康状態などの要因によって変化し得る(Guyton & Hall, 2006). 全脳血流は毎分 750ml から 900ml で、安静時心拍出量の 15%に相当する. 脳は、全身の酸素摂取量の約 20%を消費している(Guyton & Hall, 2006).

MCA は側頭葉や前頭葉、頭頂葉など、大脳の外側半分の血流に関与している. この動脈は測定が容易なため、侵襲的に脳流量を測定する際のターゲットとなる. MCA は内頸動脈から分岐し、頸部交感神経の支配を受けている(Netter 2014). (図 3)

2. 3 脳血流に影響を及ぼす生理的因子

身体活動は、認知機能(Erickson et al., 2011)や脳全体の健康維持に重要(Ainslie et al., 2008)な CBF を増加させることが示されている. この現象が起こる正確なメカニズムは完全に解明されていない. 身体活動が CBF を増加させる理由は、おそらく多因子であり、実施した運動の種類、強度、およ

び持続時間に依存する可能性がある。本節では、先行研究で脳血流に及ぼす影響が示されている、動脈血中二酸化炭素分圧および血圧について説明する。

2. 3. 1 動脈血中二酸化炭素分圧が脳血流に及ぼす影響

脳の血管は、血中の動脈血中二酸化炭素分圧 (PaCO_2) に対して敏感に反応する (Markwalder et al., 1984)。CBF の指標である MCAv もまた、 PaCO_2 の変化に対して敏感である。 PaCO_2 が増加すると血管拡張が起こり、MCAv が増加し、減少すると血管収縮が起こり MCAv が減少する (Ainslie & Duffin, 2009; Ogoh & Ainslie, 2009; Sato et al., 2011)。安静時に PaCO_2 が 50% 増加すると MCAv を約 70% 増加させる (Ainslie & Duffin, 2009) という報告や、 PaCO_2 が 1mmHg 増減すると血管拡張および収縮により MCAv が 4 % 増減する報告がされている (Rangel-Castilla et al., 2008)。

2. 3. 2 血圧の脳血流への影響

脳には自己調節機構があり、動脈圧 60～150mmHg の範囲では MAP の変化に対して CBF がほとんど影響を受けず、脳循環は一定に保たれる (Lassen 1959)。ただし、最近の MAP 変動に対する CBF の反応に関する研究では、CBF は完全に安定した血行動態を示さないことが報告されている (Panerai, 2008; Tzeng et al., 2010)。Panerai は、脳の自己調節は、しばしば線形過程であると仮定されるが、CBF と MAP の関係は、年齢、性別などいくつかの要因によって影響を受ける可能性があり、より複雑であることを強調している (Panerai, 2008)。年齢では、若年者に比べて高齢者ではより非線形であることが示され、脳の自己調節機能が加齢とともに働かなくなる可能性が示唆された (Van Beek et al., 2008)。性別では、CBF と MAP の関係は男

性よりも女性でより非線形であり，男女間のホルモンの違いに起因する可能性があることが示された (Ghisleni et al., 2015).

脳循環の自己調節機能は，MAP の変化を完全に否定するものではない可能性がある．CBF は血圧の急性変化に敏感である (Ogoh & Tarumi, 2019).

2. 3 脳の代謝的变化の計測手法

近年の脳活動計測装置の技術的進歩により，ヒトを対象とした脳科学研究は大きな進歩を遂げた．神経細胞の活動の際には代謝がおこる．代謝はすなわち，神経細胞の活動時にエネルギーを必要とし，糖をエネルギーに変えるために酸素を必要とする一連の流れである．代謝的变化の計測手法として，陽電子断層像 (positron-emission tomography : PET)，機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging : fMRI)，経頭蓋ドップラー (transcranial doppler ultrasonography : TCD) などがある．

感覚や運動などの認知課題を行うと，神経細胞活動が局所的に増大する．そして，局所的なエネルギー消費の増加を介し，直接的または間接的に，局所的な血管拡張につながる (Deppe et al., 2004)．また，神経細胞の活動に伴い，酸素消費が増加し，脱酸化ヘモグロビンの増大に続いて酸素化ヘモグロビンが増大する．神経活動時など，脳の特定部位で代謝需要が高まると，一酸化窒素などの血管拡張分子が生成され，微小血管の平滑筋細胞を弛緩させる．その結果，局所的に血管拡張が起こる．微小血管の直径が小さくなり，血流抵抗が減少して，より多くの血液がその部位に流れるようになる． (Deppe et al., 2004)．最終的に大動脈血流速度が増加する (図 4)．PET では，神経活動に伴い，神経細胞の中で行われる代謝により生じる酸素消費が，

血液のヘモグロビンによって補われる際、ヘモグロビンに付着する酸素に放射性同位元素による標識をつけ、その分布を計測する (Foster et al., 2014).

fMRI は、血液のヘモグロビンが酸素とむすびついているか否かによって、電磁気的な特性の違いを利用する。血液のヘモグロビンが酸素とむすびついている際に、局所の磁場に不均等に影響を受け、T2 という緩和時間に生じる変化 (BOLD 信号) を捉える (Chen & Glover, 2015).

TCD は、ドップラー効果の性質を用いている。動いている物から発せられる波 (音、光など) は、波の速度に動いている物の速度が増減され変化がおきる。その波を定点で観測すると、近づいてくる際には周波数が高く、遠のく際には周波数が低くなる。これがドップラー効果である。TCD は、高周波の音波が物質を介して跳ね返り、体表面に当てたプローブにより検出することにより脳動脈を通る血流の速度を測定する (Deppe et al., 2004). (図 4).

本研究で用いた TCD は、さまざまな臨床場面で、高いサンプリングレートで、ヒトの中大脳動脈 (MCA) などの大動脈の血流速度の絶対変化を評価する非侵襲的な方法である (Fantini et al., 2016; Robba et al., 2018). TCD は安価で安全な測定法である (Narayan et al., 2018). PET および fMRI は、賦活した脳領域における血液量と、その他の領域の血液量とを比較した際の相対的な増加を反映する。一方、TCD によって測定された脳血流は、全脳の血流量の変化を反映している (Deppe et al., 2004).

MCA_v は速度のみを計測しているものの、生理的条件下では血管径に変化がない (Querido & Sheel, 2007) ので MCA の血流量の指標となる。MCA_v は CBF の信頼できる指標であるとされている (Kirkham et al., 1986; Serrador et al., 2000; Peebles et al., 2007).

2. 4 本論文の構成と各章の目的

本論文では、以上の研究成果を踏まえ、次の3つの実験研究を実施し、一過性の楽器演奏に伴う脳血流の応答を検討すること、および演奏中の脳血流の応答に影響する生理機能や因子を検討することを目的とした。

まず、研究1（第3章）では、楽器演奏がMCA_vに与える影響を明らかにすることを目的とした。

次に、研究2（第4章）では、楽器演奏に伴うCBFの変化における読譜の役割を明らかにすることを目的とした。テンポの影響を併せて検討した。

研究3（第5章）では、音楽家と非音楽家を対象に、音楽の聴取がMCA_vを増加させるかを明らかにすることを目的とした。加えて、音楽の特徴である、長調・短調によるCBFの変化も検討した。

第6章では、研究1, 2, 3によるMCA_vの変化が、音楽刺激によるものかを検討することを目的とした。

第7章では、これらの研究について、総合討議を行った。

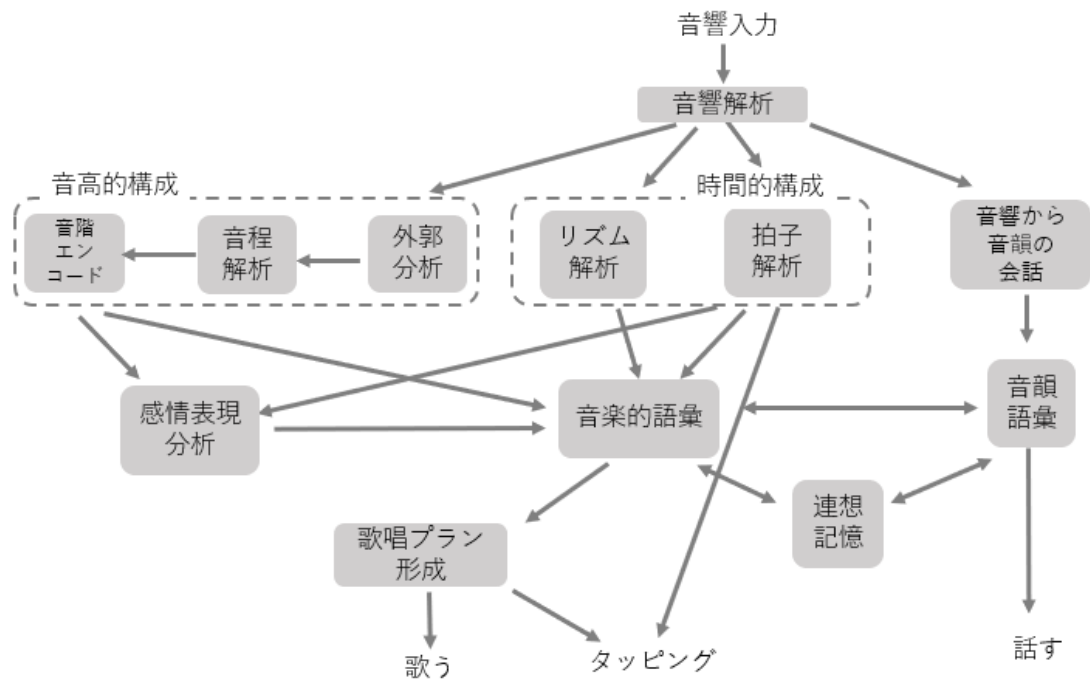


図1 音楽知覚と記憶のモデル

Peretz et al.,2003 の図を改変

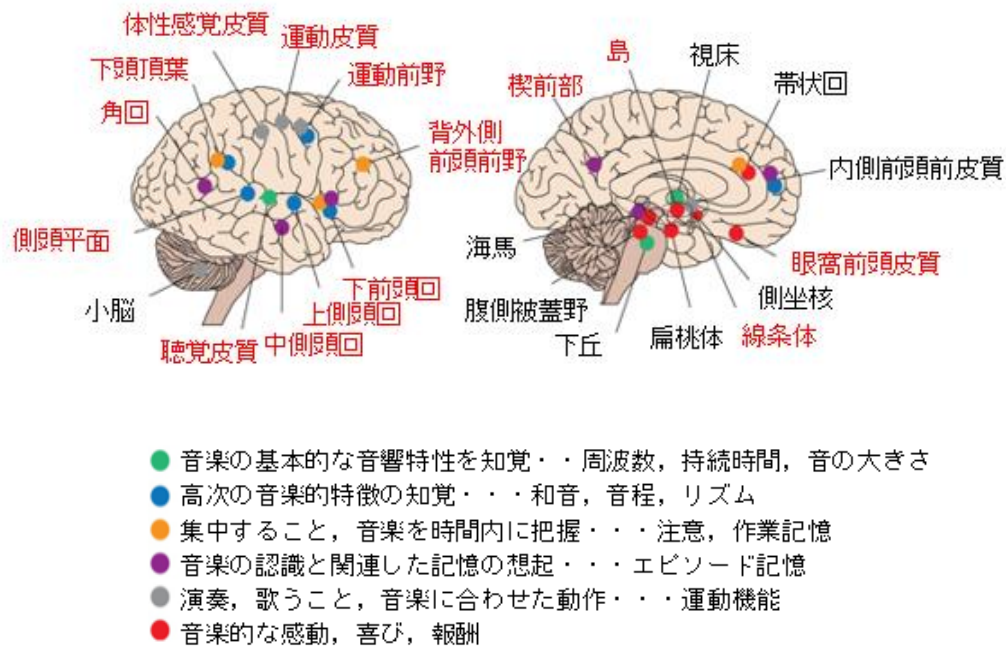


図3 健常人の脳での音楽処理に関連する脳領域

音楽の聴取（一部演奏）により，聴覚，認知，感覚運動，感情機能が制御され，広範囲の両側ネットワークの活性化が示唆されている．赤字で示した領域は，中大脳動脈から血流を供給されている．Särkämö et al.,2013 の図を改変．

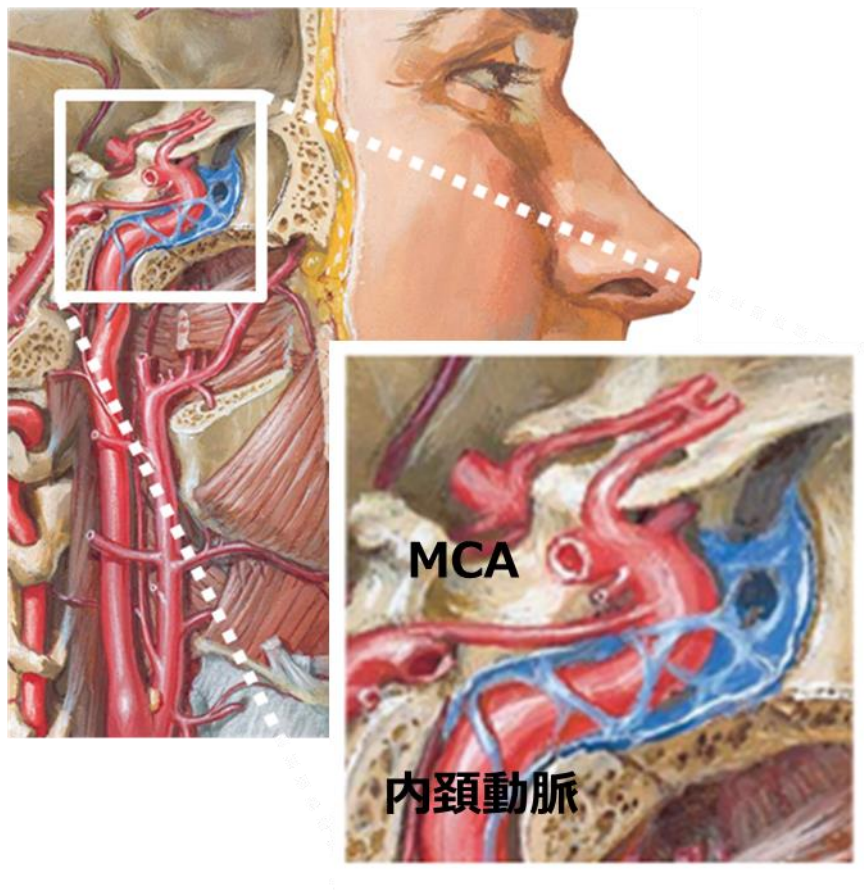


図2 中大脳動脈の位置

MCA は内頸動脈から分岐している。Netter, 2014 の図を改変。

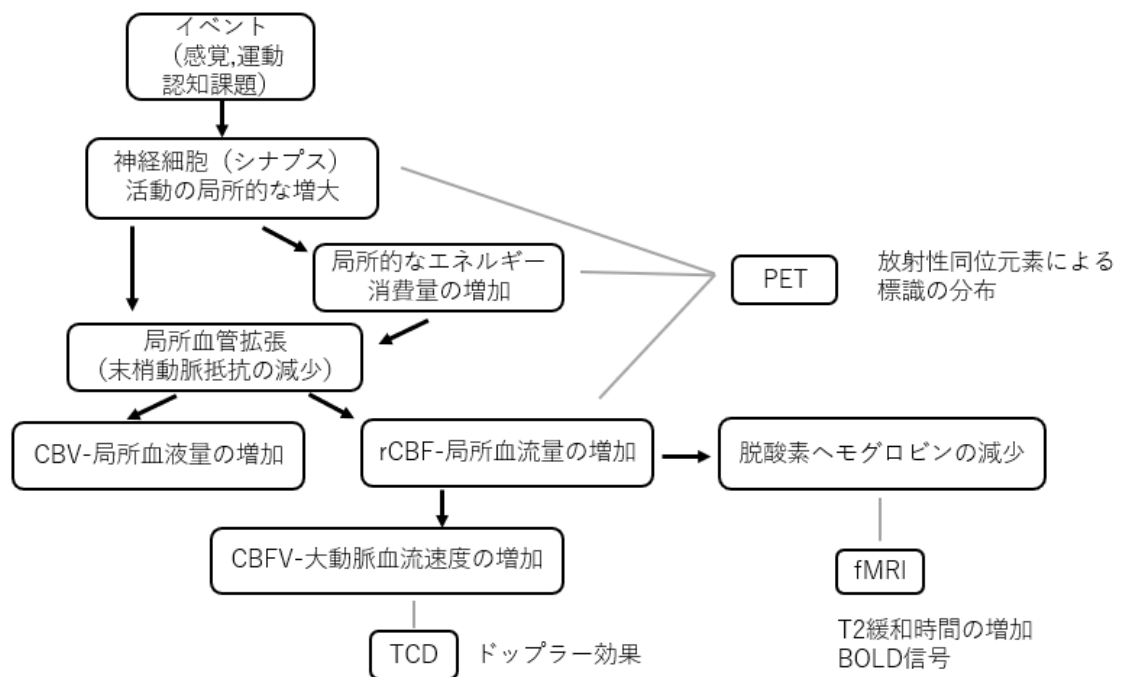


図4 脳の代謝的変化の計測手法である TCD, fMRT, PET の間の相互作用.

Deppe et al.,2004 の図を改変

第3章 楽器演奏が中大脳動脈の血流に与える影響（研究1）

3. 1 背景と目的

楽器の演奏に伴い、脳の多くの領域が活性化することが、fMRI や PET を用いた研究によって明らかにされている (Sergent et al., 1992a; Haslinger et al., 2004; Parsons et al., 2005; Zatorre et al., 2007). この活性化は、他の脳領域と比較して血液量が増加することで確認される。ただし、fMRI も PET も、血液量や血流の絶対的な変化を示すことはできない。脳が活性化した領域で血流量が増加しても、活性化していない他の領域で血流量がわずかに減少すれば、全脳の血液量や脳血流量は安定していると考えられる。したがって、楽器演奏が全脳血流の絶対的な変化に及ぼす影響については、まだ解明されていない。

楽器演奏は、CBF を増加させる可能性がある。CBF を広範囲に反映する MCAv は、一過性の身体活動に伴って増加する (Sato et al., 2011). サイクリング運動などにより MCAv は最大 20 % 程度増加する (Sato et al., 2011). 楽器演奏における身体活動は、低強度で小さな筋群しか使わないが、複雑な筋活動と情報処理が要求される (Furuya et al., 2011). 複雑な運動には、局所的な活性化と脳の領域間の感覚運動コミュニケーションの相互作用が必要である。単純な運動と複雑な運動を比較した先行研究では、複雑な運動タスクは、単純な運動タスクよりも脳のより大きな領域で局所 CBF が増加させる (Shibasaki et al., 1993). 楽器演奏は小さく複雑な筋活動を含むため、他の身体活動と同様に CBF を増加させる可能性がある。楽器演奏により CBF が増加するの否かはこれまで明らかにされてこなかった。

経頭蓋ドップラー (TCD) 流量計は、ヒトの MCA のような大きな血管

の血流速度の絶対値の変化を、様々な状況下で、高いサンプリングレートで評価できる非侵襲的方法である (Fantini et al., 2016; Robba et al., 2018). 運動中の MCA_v の変化は、その上流である内頸動脈の平均血流の変化と同様であることが示唆されている (Sato et al., 2011). TCD によって、音楽家が音楽を通常通りに演奏しているときの脳血流を記録することができる. また、PET や fMRI は騒音を発生するが、TCD は検査中に音を発生しない. 被験者は自分の出す音を通常の演奏にフィードバックして聞くことができる.

本研究では、TCD 流量計を用いて、被験者が楽器を演奏している間の MCA_v の絶対的な変化を測定した. また、CBF を変化させることが知られている血圧 (BP) や動脈血中炭酸ガス分圧 (PaCO₂) など、CBF を変化させる可能性のある生理的な因子の寄与を検討した. 運動時に CBF が増加することから推察して、楽器演奏時にも CBF が増加するという仮説を検証した.

3. 2 方法

対象者

健常成人の音楽家 13 人が研究に参加した. 全員がクラシック音楽のトレーニングを受けており、6 年以上定期的に楽器を演奏していた. 被験者は自律神経系疾患や心臓疾患の既往がなく、喫煙や服薬もなかった. また、認知障害やうつ病の既往もなかった. 被験者は、本研究の目的と参加内容に関する説明を受けた後、本研究への参加に書面で同意した. 本研究は、東京工業大学の人を対象とした研究倫理審査委員会の承認を得ている (承認番号: 第 2017098 号).

プロトコル

実験当日、被験者に実験前 6 時間にわたり、カフェインの摂取と激しい運動を控え、実験前 2 時間は食事を控えるよう求めた。被験者には、難易度の異なる 3 つの曲、すなわち初めて見る曲 (FS)、練習中の曲 (PR)、既に習得している曲 (MS) を演奏させた。PR および MS は被験者が楽曲を選定し、FS は被験者と相談の上楽曲選定した。また、FS は被験者に初めて見る楽曲かどうかを確認した。各楽曲をランダムな順番で 10 分間演奏させた。楽曲を 1 度演奏する時間が 10 分に満たない場合、PR および MS では、曲の始めから繰り返すように指示した。FS は同レベルの楽曲をいくつか準備し、常に初めて見る曲を 10 分間演奏させた。演奏と演奏の間には少なくとも 10 分の休息時間を設けた。

MCA_v は演奏の 10 分前から演奏の 10 分後まで連続的に測定した。血圧は演奏直前と演奏直後に測定した。10 分間の演奏の 9 分目に、被験者の右腕に血圧測定用のカフを装着した。血圧測定と同時に 6 名の被験者の呼吸データを 1 分間測定した。

測定方法

MCA_v は TCD 流量計 (WAKI, Atys Medical, St-Genis-Leval, フランス) を用い、左側頭部にヘッドバンドを装着したプローブを介して測定した。血圧は上腕式血圧計 (UA-704, A&D, 東京) を用いて測定した。一回換気量と呼気終末 CO₂ 分圧 (PETCO₂) をガス分析器 (AE-310S, AE-310S, ミナト医科学, 日本) を用いて測定した。測定の際ノーズクリップと、マウスピースを装着した。

データ解析

データは平均値 $\pm$ SD 値で表した。各演奏の安静時、演奏時、回復時の最後の 1 分間の MCA_v と $PETCO_2$ を平均化し、解析に使用した。脳血管コンダクタンス指数 (CI) は、 MCA_v の平均値を平均血圧 (MBP) で割ることにより算出した。CI は、ある圧力差で循環するときの血液の流れやすさである。また、血管抵抗は、ある圧力差で循環するときの血流に対する障害である。コンダクタンス (血流/圧力) は抵抗 (圧力/血流) の逆数であり、コンダクタンスと抵抗の指標は交換可能とされている (Joyce et al., 2019b)。BF の変化は血管活性によっても決まり、コンダクタンスで評価される。 MCA_v と BP に及ぼす時間の影響を一元配置反復分散分析により検討した。有意な F 値が得られた場合、Dunnett のポストホック検定を用い、安静時、演奏時、回復時の値を比較した。統計的有意水準は $P \leq 0.05$ とした。すべての統計解析は、SPSS (IBM SPSS Statistics 21.0 for Windows, IBM, Tokyo, Japan) を用いて行った。

3. 3 結果

安静時の MBP は、演奏の難易度にかかわらず、非常によく似た値であり、FS, MS, PR はそれぞれ 86 ± 12 , 88 ± 10 , 84 ± 11 mmHg であった (図 3)。MBP の有意な上昇は FS 試行 (安静時 88 ± 10 mmHg と比較して、演奏中 90 ± 13 mmHg, $F=5.54$, $p=0.05$, +5%) と PR 試行 (安静時 84 ± 11 mmHg, と比較して、演奏中 89 ± 13 mmHg, $F=6.23$, $p=0.012$, +6.2%) で観察され、MS 試行では観察されなかった。

また、FS, MS, PR の各試験を行う前の被験者の安静時 MCA_v には有意な差がなかった (それぞれ 0.54 ± 0.09 , 0.53 ± 0.1 , 0.52 ± 0.1 m/s; 図 3)。

MCA_v は MS 試行（安静時 0.53 ± 0.1 m/s と比較して、演奏中 0.55 ± 0.1 m/s, $F=3.68$, $p=0.051$, $+5.2\%$ ）と PR 試行（安静時 0.52 ± 0.1 m/s と比較して、演奏中 0.56 ± 0.14 m/s, $F=3.61$, $p=0.032$, $+8.6\%$ ）で有意に増加したが、FS 試行では増加しなかった。

CI は、MS の曲を演奏したときのみ、有意な減少が認められた。PETCO₂および酸素消費量（VO₂）は、スコアの難易度による有意な影響を示さなかった（表 1）。

MBP と MCA_v の相対的変化の解析では、FS, MS, PR の各スコアにおいて、2 つのパラメータの間に関連性は見られなかった（図 4）。

3. 4 考察

本研究の主な知見は、初めて見る曲を演奏するとき（FS 試行）を除き、楽器を演奏するときに被験者の MCA_v が 5-9% 増加したことであった。MCA_v の増加は、ほとんどの被験者で観察された。血圧は MB は FS 試行と PR 試行で有意な増加を示したが、MBP の増加と MCA_v の増加に関連性はみられなかった。PaCO₂ の推定値である PETCO₂ は安静時と比較して変化しなかった。酸素摂取量や換気量に有意な増加は見られなかった。これらの結果は、楽器の演奏が代謝要求の増加を伴わずに CBF を増加させることを示唆している。

MCA_v の増加の程度は、これまでに報告されている運動中の増加よりも小さかった。運動中の MCA_v の増加の程度は 10% から 20% の範囲であり、例えば VO₂ が安静時の 4 倍まで増加すると MCA_v は 20% 増加していた (Sato et al., 2011)。運動中、MCA_v は VO₂ が最大値の 70% に達するまで増加し続ける (Moraine et al., 1993; Marsden et al., 2012; Smith et al., 2012)。本

研究の楽器演奏に伴う CBF の増加の程度は、運動中に観察されたものよりもはるかに低かったものの、 VO_2 が増加しないにもかかわらず、CBF は楽器演奏中に増加した。

FS で MCAv が増加しなかったことについては、被験者がより簡単な FS を選択したため、フィンガータッピングの頻度が低くなったと考えられる。被験者は、初見の音楽を演奏することの難しさから、自分のスキルに見合った難易度よりもはるかに低いレベルの楽曲を選択したようである。例えば、MS で「ポロネーズ第 6 番 「英雄」 Op.53 変イ長調 作曲 Frederic Chopin」を弾いた被験者が、FS では「荒野のバラ Op.78-3 ハ長調 作曲 Gustav Lange」を弾くなどである。日本の音楽出版社「全音楽譜出版社」によると、ポロネーズ第 6 番は F ランク（上級上）、荒野のバラは A ランク（初級）である。両手のタッピングの頻度は、音楽の難易度が高くなるにつれて増加する。近赤外分光法で観察された一次運動野の血液量の相対的増加は、最大頻度のフィンガータッピング課題では低頻度のフィンガータッピング課題よりはるかに大きかった(Kuboyama et al., 2004)。FS の演奏時における低頻度のフィンガータッピングは、局所的な脳の活性化を、わずかしかもたらさないかもしれない。

本研究で行った楽器演奏時の MCAv 測定は、様々な脳領域の活性化を示した先行研究に比べて、2 つの利点がある。まず、大きな血管を対象とし、血流速度の絶対的変化を測定したことである。fMRI や PET を用いた研究では、楽器演奏中に活性化する脳領域が、他の脳領域と比較して血液量が増加するかどうかを検討されている(Sergent et al., 1992a; Haslinger et al., 2004; Parsons et al., 2005; Oken et al., 2006; Zatorre et al., 2007)。我々は、脳血流速度の増加を絶対値で確認した。

第二に、これまでの fMRI や PET による研究では、被験者は制限された環境で楽器を演奏していたが、本研究では通常の演奏環境に近い条件下で楽器を演奏している。例えば、fMRI 検査を行うために、fMRI に入る程度の小さい鍵盤が適用されており、片手のみの演奏や、楽曲ではなく音階のみの演奏が用いられ、仰臥位で演奏している。また、fMRI や PET 装置から発生する雑音が大きい状況で演奏を行っている (Baumann et al., 2005; Bangert et al., 2006b)。これらの要因が、被験者の演奏や脳神経活動に影響を与えたと考えられる。本研究の結果は、被験者が通常の演奏環境で楽器を演奏することができたため、音楽演奏に対する通常の CBF 反応を反映している可能性が高い。

演奏中に観察された MCA_v の増加に関連する生理学的要因については、議論の余地がある。血管拡張を反映する CI が増加しなかったため、MBP の増加が本研究で観察された MCA_v の増加に寄与している可能性がある。しかし、図 4 に示したように、個人の MBP の相対的变化と MCA_v の相対的变化の関係が示されていないため、MCA_v への寄与は明確ではなく、少なくとも比例関係にない非線形であった。PaCO₂ の推定値である PETCO₂ は変化しなかったため、MCA_v の増加には寄与しなかったと考える。また、MCA_v の増加に対する MBP と血管拡張の寄与は、単純でも明確でもなかったため、神経活動に伴う代謝の向上を反映しているのではないかと考えられる。

MCA_v は、楽器演奏に関連する領域への血流を供給している。楽器演奏には感覚、運動感覚、聴覚が関与し、これらの感覚が関連する脳領域は、脳全体に分布している (Wan & Schlaug., 2010; Zatorre et al., 2007)。楽器の演奏に関わる脳領域は、背外側、下前頭皮質 (ブローカ野を含む)、上側頭

回（ウェルニッケ野を含む）、辺縁上回、補足運動野、前運動野から構成され、ネットワークを形成している可能性がある(Bangert et al., 2006b). これらの領域はすべて MCA を経由して血液を受け取っている。したがって、本研究における MCA_v は、これらの領域の血流を反映していることが予想される。

本研究では、MCA_v と MBP の増加について一貫した結果を得ることはできなかった。これは、演奏された音楽が厳密に管理された性質のものではなかったことに一因がある。被験者の演奏能力にばらつきがあるため、難易度に合わせて被験者自身が音楽を選択した。運動に置き換えると、運動の強度が安定的かつ一様でなかったことになる。MCA_v と MBP の増加の程度は運動強度によって異なる(Witte et al., 2019)。楽器演奏に伴う MCA_v や MBP の上昇を手や腕の運動という観点から検討する場合、試行する楽曲を合わせる必要がある。楽器演奏が MCA_v と MBP に及ぼす影響を明確に表現するためには、何らかの手法が必要である。

TCD で測定される MCA_v は、CBF の指標として以前から評価されている。MCA_v は血管径が変化しない場合は CBF として扱うことができる。開頭時や fMRI で測定した MCA 径は、生理的刺激（動脈圧や PaCO₂ など）を加えても変化しないことが報告されている(Valdueza et al., 1929; Giller et al., 1993; Serrador et al., 2000)。運動時においても、TCD で測定した MCA_v の変化は、上流の動脈である内頸動脈の平均血流の変化と同様の時系列を示す(Sato et al., 2011)。したがって、本研究では、MCA_v が CBF を示すと考えられよう。

本研究では、被験者の時間的負担を軽減するため、コントロールデータを収集しなかった。ただし、ほとんどの変数が演奏前の安静時の記録まで早期

に回復したことから、観察された変化は楽器の演奏に対する反応であると結論づけることができる。

本研究の限界は、ヴァイオリン演奏とピアノ演奏は運動への関与が異なるということである。より明確な解明のためには、ヴァイオリンのみで、より大きなサンプルサイズを用いたさらなる調査が必要である。

3. 5 まとめ

楽器演奏は、少なくとも技術的に演奏することが難しい楽曲を演奏した場合に MCA_v を増加させ、増加の程度は演奏曲の難易度に関連することが示された。これまでの fMRI や PET を用いた研究で、楽器演奏時に脳内の血流が増加する領域が明らかにされているものの、これらの研究では脳全体の CBF は評価されていない。私たちの知る限り、楽器演奏が CBF に与える影響を明確に見出した研究は今回が初めてである。

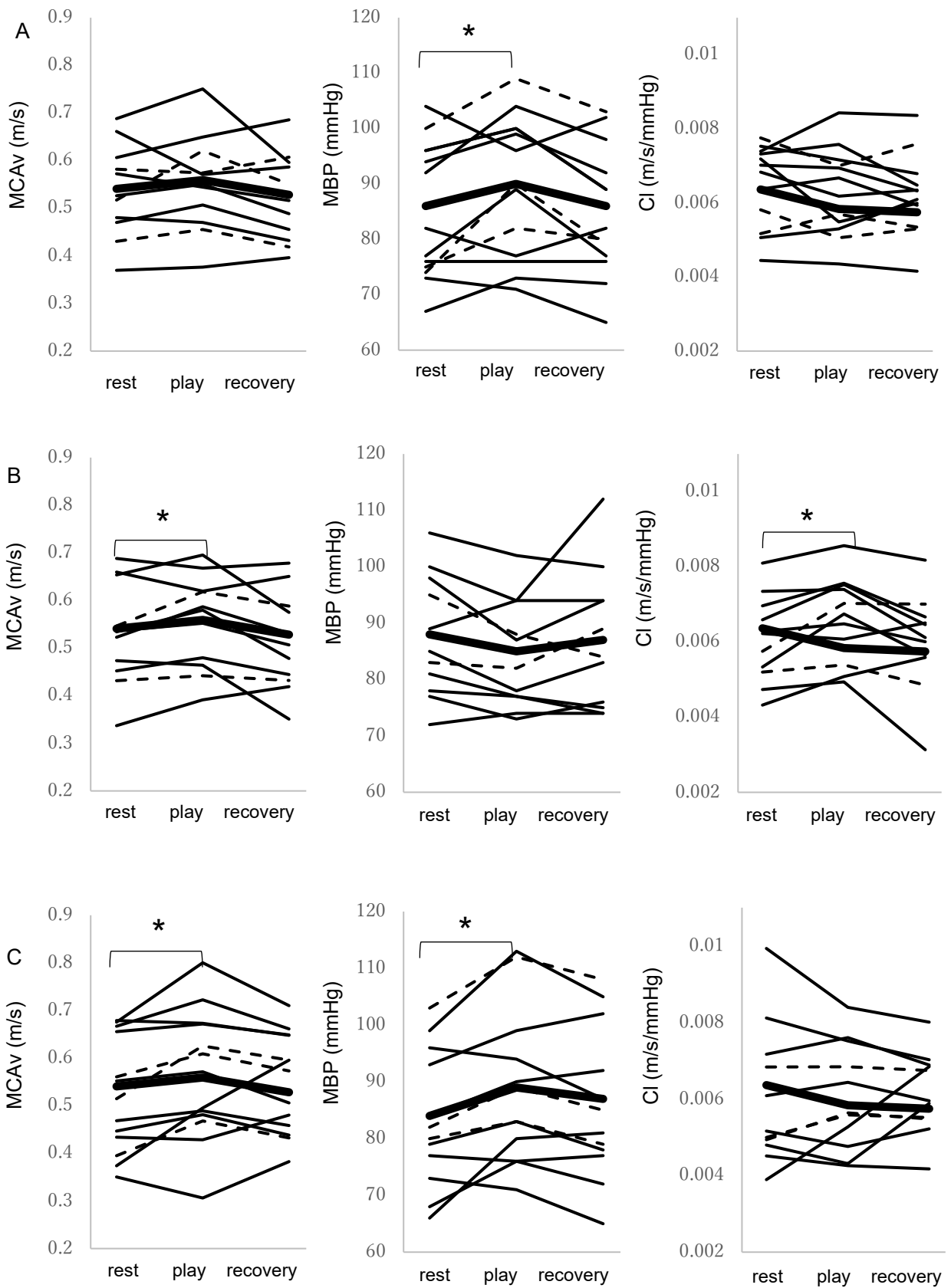


図3.すべての被験者の平均値，およびピアノ奏者とヴァイオリン奏者の個人値.

A : FS (初めて見る曲), B : MS (既に習得している曲), C : PR (練習中の曲) それぞれの演奏の安静 (rest), 演奏中 (play), 回復 (recovery) の中大脳動脈血流速度 (MCA_v), 平均血圧 (MBP), およびコンダクタンス (CI) を示した。すべての被験者の平均値 (太い黒線) と, ピアノ奏者 (細い黒線), ヴァイオリン奏者 (点線) の個人値である. *P≤0.05 vs. rest.

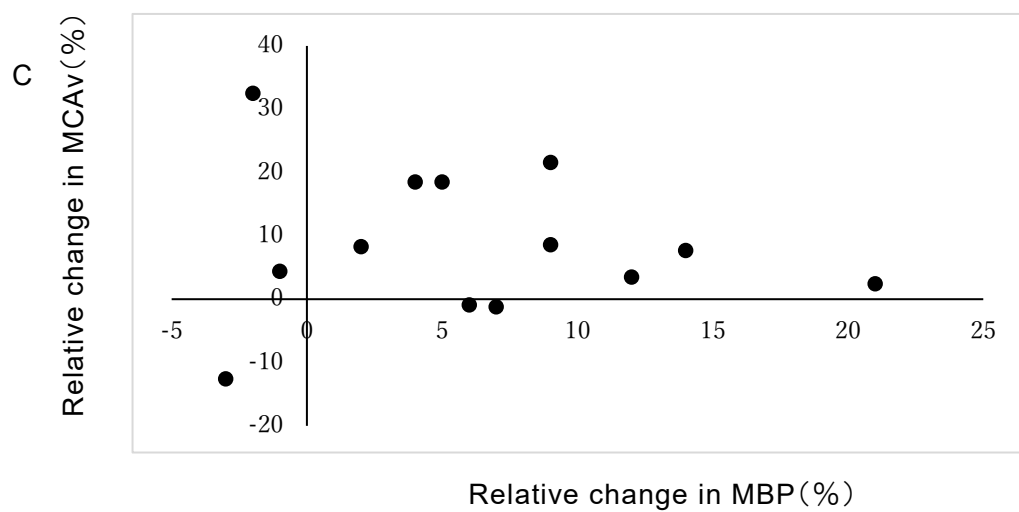
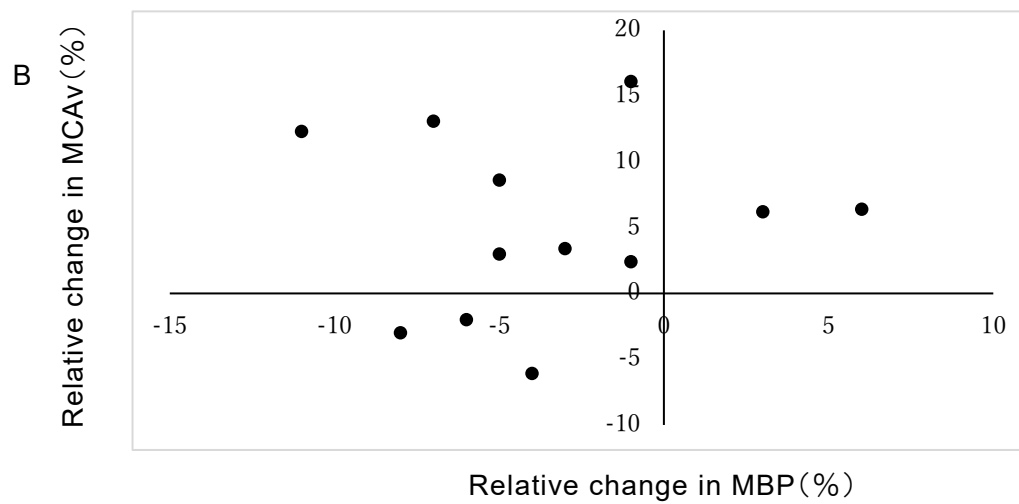
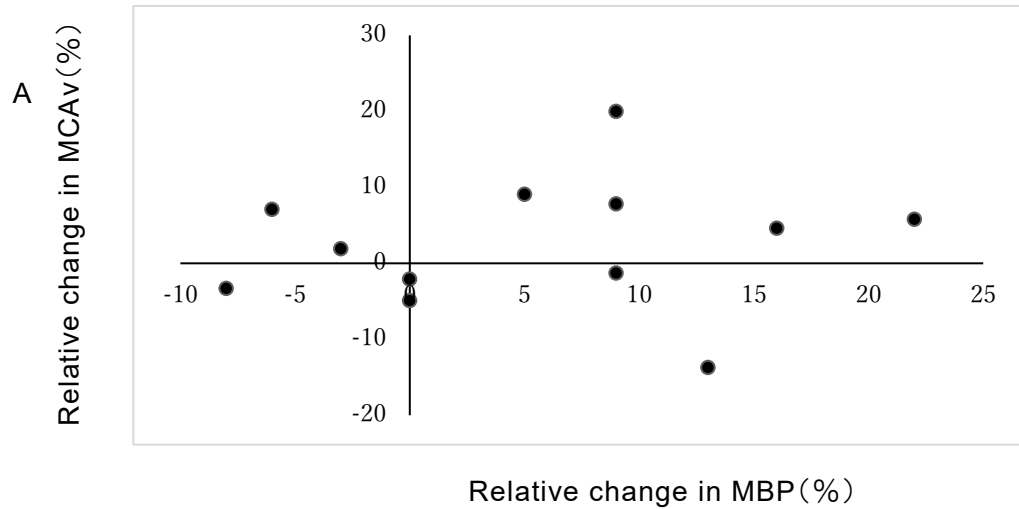


図 4 . 個人の平均血圧 (MBP) の相対的変化と個人の中大脳動脈血流速度 (MCA_v) の相対的変化

個人の MBP の相対的変化を MCA_v の相対的変化に対してプロットしたものである。有意な相関は観察されなかった。A : FS (初めて見る曲), B : MS (既に習得している曲), C : PR (練習中の曲) である。

第4章 楽器演奏に伴う読譜が中大脳血流に及ぼす影響（研究2）

4. 1 背景と目的

研究1より楽器演奏中に脳血流（CBF）が増加することが示唆された。fMRIおよびPETの研究により、人が楽器を演奏している間、脳の多くの領域が活性化することが示されている。音楽家は、演奏と聴覚の両課題において、運動前野、一次運動野、補足運動野の活性化を示した(Hund-Georgiadis & Yves Von Cramon, 1999; Meister et al., 2004; Baumann et al., 2005)。音階演奏と協奏曲演奏は、一次運動野、体性感覚野、下頭頂葉、補足運動野、運動野、両側上・中側頭葉、右視床、前・後小脳を活性化する(Parsons et al., 2005)。また、超音波ドップラー（TCD）を用いて、被験者が楽器を演奏すると中大脳動脈の血流速度（MCAv）が5～9%増加することを研究1で報告した(Kawasaki & Hayashi, 2022)。このことは、楽器演奏時の全脳血量および局所脳血量の増加、または脳血流の絶対的な増加を示唆している。

楽器演奏は、楽譜を読む、楽器を演奏する、音を聴取する、演奏により発生した音をフィードバックする、といった音の調整を同時に行う必要がある。この一連の音楽生成は、大脳皮質の活性化を反映している。右手で演奏すると左運動野、右手の運動表現に対応する右小脳、左運動前野が、音階を聴くと左半球の両側二次聴覚野と上側頭回が活性化される。また、楽譜を読むと、両側視蓋外領域が活性化される(Sergent et al., 1992b)。ヒトは、楽譜を読むとき、演奏するとき、音楽を聴くときに、メロディー（旋律）、ハーモニー（和声）、感覚、リズムなどの音楽の特徴を知覚する。この知覚は、前下内側前頭前野、運動前野、上側頭回前部および後部、下頭頂葉を含むネット

ワークで行われる (Janata et al., 2002; Patel, 2003). 楽器演奏, 音楽の聴取, 楽譜の読解など, 演奏に伴う CBF の増加がどれに起因するかは不明である.

本研究の目的は, 異なるテンポでの楽器演奏に伴う CBF の増加における読譜の役割を検討することであった. この目的を達成するために, 速いテンポと遅いテンポで楽譜を読みながら演奏した場合と, 楽譜を見ずに演奏した場合の CBF の反応を比較検討した.

4. 2 方法

対象者

健康成人の音楽家 17 名 (男性 8 名, 女性 9 名, ヴァイオリニスト 6 名, ピアニスト 11 名, 年齢 26 ± 8.9 歳) が研究に参加した. 全員がクラシック音楽のトレーニングを受けている. 参加者は 6 年以上定期的に楽器を演奏していた. 被験者は自律神経系疾患や心臓病の既往はなく, 喫煙や薬の服用もなかった. また, 認知障害やうつ病の既往もなかった.

参加者は全員, この研究の目的と参加に関する説明を受けた後, 書面にて参加に同意した. 本研究は, 東京工業大学人体研究倫理審査委員会の承認を得ている (承認番号: 第 2019038 号).

プロトコル

被験者は, 実験前 6 時間はカフェインの摂取と激しい運動を控え, 実験前 2 時間は食事を控えるよう指示された. 被験者は, 試験曲として指定されたパッヘルベルのカノンを, 8 分音符=60 の遅いテンポと 8 分音符=80 の速いテンポで, 演奏および読譜を行った. 5 つ試行は A: 8 分音符が 80 のテンポで演奏 (PL80), B: 8 分音符が 80 のテンポで読譜 (RE 80), C: 8 分音符

が 60 のテンポで演奏 (PL 60), D : 8 分音符が 60 のテンポで読譜 (RE 60), E : 8 分音符が 80 のテンポで暗譜による演奏 (ME 80) であった. PL80 および PL60 の演奏は, 楽譜を見ながらの演奏であった. RL80 および RL60 の読譜は楽器を弾かず楽譜を読んだ. ME80 の演奏は, 楽譜を見ずに演奏した. 試行はそれぞれ 10 分間で, 試行前にメトロノームでテンポを指示し, 演奏終了まで維持するよう指示した. 読譜の試行では, 被験者は楽譜を黙読し, 動かず, 楽器を弾くジェスチャーをしないように指示された. ME80 は演奏中の視覚処理の影響を排除するため, 13 名 (ヴァイオリニスト 5 名, ピアニスト 8 名) が楽譜を見ずに記憶に基づいて演奏した. 5 回の試行の順番は被験者ごとにランダムにし, 試行と試行の間には十分な休息時間を設けた. すべての試行は, 録音や他の人の演奏を聴くことなく行われた.

測定

MCA_v は経頭蓋超音波ドップラー血流計 (WAKI, Atys Medical, St-Genis-Leval, France) を用い, プローブを, ヘッドバンドを介して左側頭部に装着して測定した. 血圧は上腕式血圧計 (UA-704, A&D, 東京) を用いて記録した.

データ分析

データは平均値±標準偏差で表した. 安静時, 演奏時, 回復時の各 10 分間の最後の 1 分間の MCA_v を解析に使用した. 時間と試行の効果を調べるために二元配置分散分析を行った. PL80 と RE80, PL60 と RE60の間では楽器演奏の効果を, PL80 と PL60, RE80 と RE60 ではテンポの効果を, 2 元配置分散分析で検討した. ME80 と PL80 で T 検定を行い, 楽譜を見ずに

演奏した視覚処理の効果を検討した．有意な F 値が得られた場合，安静時，演奏時，回復時の変数を Dunnett の post hoc 検定で比較した．統計的有意水準は $p \leq 0.05$ とした．すべての統計解析は，SPSS (IBM SPSS Statistics 21.0 for Windows, IBM, Tokyo, Japan) を用いて行った．

4. 3 結果

安静時の MCA_v は各試行で同程度であった (図 5)．MCA_v には時間の影響が見られた．MCA_v は PL80 (安静時 0.53 ± 0.1 m/s と比較して，演奏中 0.56 ± 0.1 m/s, $F=5.95$, $p=0.03$, 5 %)，PL60 (安静時 0.52 ± 0.1 m/s と比較して，演奏中 0.56 ± 0.1 m/s, $F=6.73$, $p=0.004$, 7 %)，RE80 (安静時 0.52 ± 0.1 m/s と比較して，演奏中 0.56 ± 0.1 m/s, $F=4.69$, $p=0.07$, 6 %)，RE60 (安静時 0.51 ± 0.1 m/s と比較して，演奏中 0.56 ± 0.1 m/s, $F=7.14$, $P=0.02$, 9 %)，ME80 (安静時 0.49 ± 0.1 m/s と比較して，演奏中 0.56 ± 0.1 , $F=7.64$, $p=0.01$, 12 %) の試行で有意に増加した．これらの有意な増加は，回復時には見られなかった．

MCA_v の増加量には試行間で有意差はなかった．楽器演奏の効果は，PL80 と RE80，PL60 と RE60 ($F=0.26$, $p=0.41$) の間で示されなかった．テンポの効果は PL80 と PL60，RE80 と RE60 ($F=0.68$, $p=0.609$) の間で示されなかった．ME80 と PL80 ($t=1.70$, $p=0.1$) の間でも楽譜を見ることの効果は認められなかった．

安静時の MBP 値も同様であった．MBP では試行と時間における有意差は認められなかった (表 2)．

4. 4 考察

楽器演奏と読譜が MCA_v に及ぼす影響をそれぞれ検討した。その結果、楽器演奏と読譜はともに MCA_v を有意に増加させ、楽器演奏時に観察される MCA_v の増加には、楽器演奏、暗譜での演奏、読譜が関与していることが示唆された(Kawasaki & Hayashi, 2022)。PL80 と PL60 の増加は、MCA_v の 5～9% の増加を報告した我々の先行研究と一致する。RE60 と ME80 の増加は、楽器演奏時の増加に相当するが、運動時よりも小さかった。例えば、動的運動では、およそ 10～20% の増加する(Sato et al., 2011)。読譜時のみの MCA_v の増加は、楽器演奏に伴う筋活動のみによるものではなく、読譜そのものが関与していることを示唆するものである。一方、楽譜を読まずに演奏しているとき (ME80) にも同様に MCA_v が増加していることから、楽譜を読むことに関連した視覚的なタスクがなくても演奏すると MCA_v が増加し、楽曲を思い出すことや身体活動、演奏に必要な音の調整などの役割が示唆された。MCA_v の増加には、読譜、身体活動、フィードバックによる音の調節の役割が示唆されたが、脳血流に対するこれらの因子の寄与は複雑であるため、それぞれの寄与を立証または否定することはできない。

読譜時の MCA_v の増加は、楽器演奏を想像することによるものと、楽譜を読みながら演奏すること自体の影響であると説明できる。ピアニスト、ヴァイオリニスト、チェリストが楽器の演奏を想像すると、補足運動野と運動前野が活性化することが fMRI 研究で示されている(Langheim et al., 2002)。また、ピアニストが実際に音楽を演奏しているときと、音楽を演奏していることを想像しているときの両方で、運動前野の活性化が観察されている(Meister et al., 2004)。これらの領域の活性化は、読譜時の MCA_v の上昇と関連する可能性がある。

また、楽譜を読みながら演奏すると、脳の様々な領域、例えば、両側線条

体以外の視覚領域、左後頭頂後頭 (Sergent et al., 1992b)、右後頭頂小葉、頭頂間溝 (Schön et al., 2002) が活性化される。MCA_v はこれらの領域に血液を供給するためか、読譜に伴い増加する。

MCA_v の増加は、音楽の演奏や読譜を通じて脳が音楽を認識することが一因であると考えられる。音楽処理に關与するいくつかの脳領域は、MCA から血液が供給されている (Ayotte et al., 2000)。MCA 脳卒中患者には音楽認知の障害がある (Altenmüller et al., 2009; Särkämö et al., 2009)。さらに、中大脳動脈瘤破裂患者の 35% に音楽認知の障害があることが報告されている (Ayotte et al., 2000)。楽器演奏や読譜の際には、音楽を認識するための情報処理が行われ、關連する脳領域が活性化される。その結果、MCA への血流が増加すると考えられる。

演奏テンポは、演奏中および読譜中の MCA_v の増加の大きさに影響を与えなかった。本研究では、速いテンポと遅いテンポの間で MCA_v に有意差はなかった。NIRS を用いた研究では、最大頻度でフィンガータッピングを行った時の前頭葉の総ヘモグロビンの増加は、最大頻度の 25% でフィンガータッピングを行った時よりも大きかった (Kuboyama et al., 2004)。このような結果の違いは、脳の対象領域やテンポの違いに起因すると考えられる。本研究では、音楽演奏時に活性化するネットワークである背外側、下前頭皮質 (ブローカ野を含む)、上側頭回 (ウェルニッケ野)、辺縁上回、補足運動野、運動前野 (Bangert et al., 2006a) に血液を供給する MCA で血流速度が觀察された。本研究では、テンポを 8 分音符で 60 (遅いテンポ) と 80 (速いテンポ) に設定したが、熟練者のテンポは最大頻度のフィンガータッピングのテンポよりはるかに低いものであった。したがって、テンポの違いは、MCA_v の有意な増加を引き起こす可能性は低い。より速いテンポで演奏す

ることの効果は、今後の研究課題である。

本研究には2つの制限がある。第一に、楽曲の難易度を制御していないため、演奏能力の高い被験者にとっては容易に演奏できる楽曲であった可能性がある。このような被験者では、より小さな刺激では MCA_v が反応しない可能性がある。このように音楽の難易度をコントロールすることが困難であることは、本研究の限界であり、音楽を用いた他の研究においても同様であろう。第二に、本研究は管楽器の演奏や歌唱に適用することはできない。 MCA_v に影響を与える生理的要因の1つに動脈血中二酸化炭素濃度があり、これは換気によって容易に影響を受ける。その点、ピアニストやヴァイオリニストは、演奏にそれほど多くの換気を必要としない。

4. 5 まとめ

楽譜を読むかどうかにかかわらず、楽器を演奏しているときに MCA_v は増加する。

表 2 . 安静 (rest), 試行中 (play), 回復 (recovery) の平均血圧 (MBP).

	MBP (mmHg)		
	rest	play	recovery
A.PL80	86±14	86±12	88±13
B.RE80	87±14	86±14	86±13
C.PL60	87±14	86±13	88±16
D.RE60	88±16	84±12	88±12
E.ME80	87±11	90±12	86±12

A : PL80 (8 分音符が 80 のテンポで演奏), B : RE 80 (8 分音符が 80 のテンポで読譜), C : PL 60 (8 分音符が 60 のテンポで演奏), D : RE 60 (8 分音符が 60 のテンポで読譜), E : ME 80 (8 分音符が 80 のテンポで暗譜による演奏) を示す. データは平均±標準偏差である. すべての値に有意差は見られなかった.

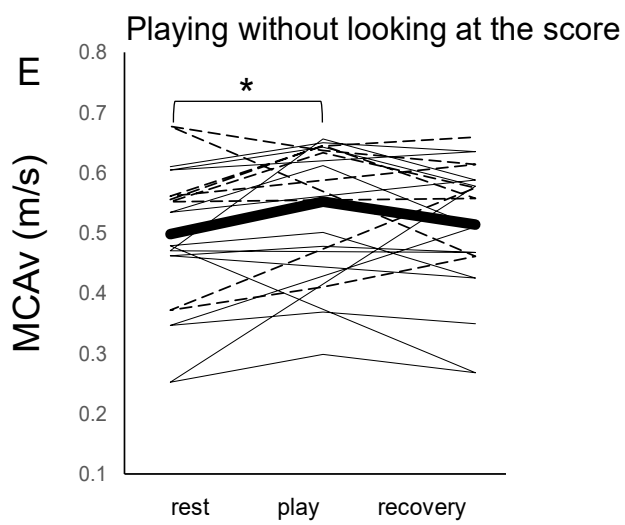
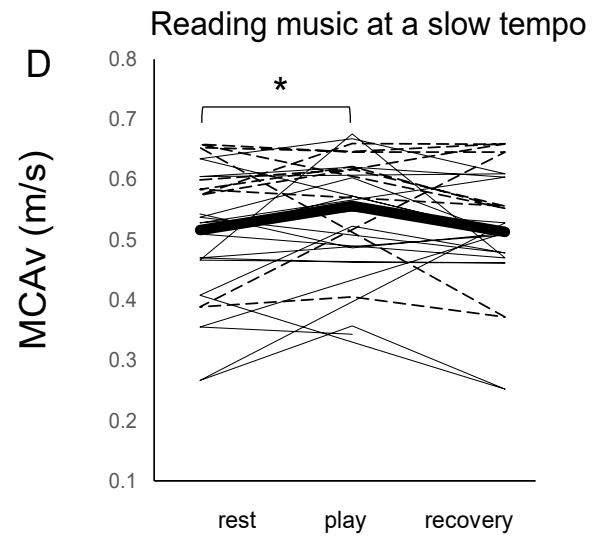
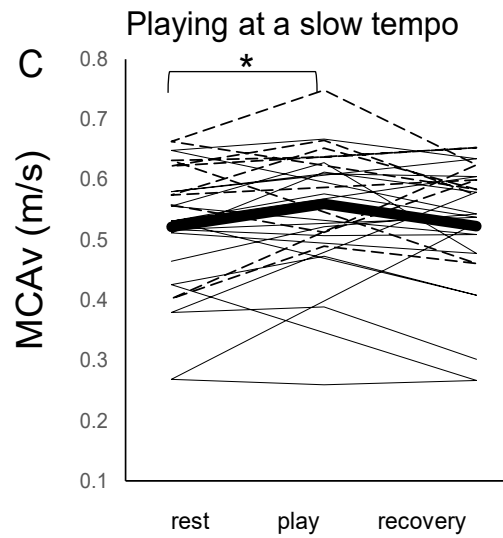
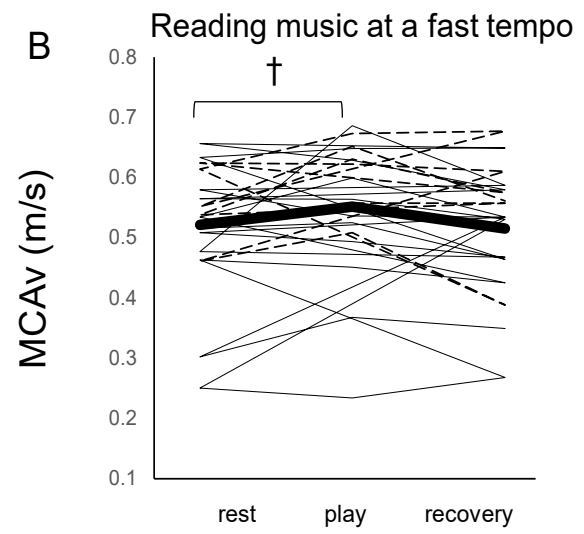
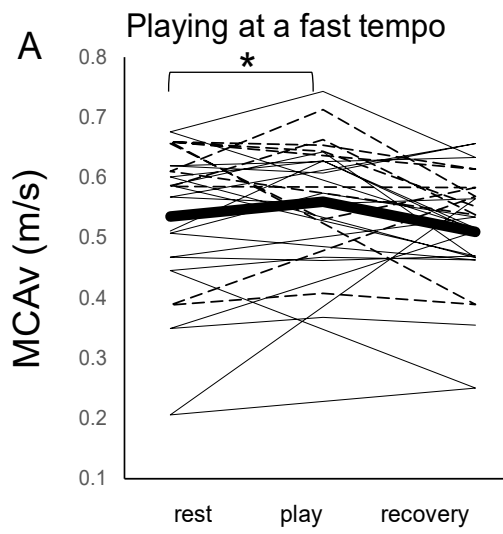


図 5. 5 つの試行における, すべての被験者の中大脳動脈血流速度の平均値,
およびピアノ奏者とヴァイオリン奏者の個人値

被験者の安静時 (rest), 試行中 (play), 回復時 (recovery) の MCA_v を表す. A : PL80 (8 分音符が 80 のテンポで演奏), B : RE 80 (8 分音符が 80 のテンポで読譜), C : PL 60 (8 分音符が 60 のテンポで演奏), D : RE 60 (8 分音符が 60 のテンポで読譜), E : ME 80 (8 分音符が 80 のテンポで暗譜による演奏) を示す. 全ての被験者の平均値 (太い黒線) とピアノ奏者 (細い黒線), ヴァイオリン奏者 (点線) の個人値を示す. * : $P < 0.05$ vs. rest. † : $P < 0.07$ vs. rest.

第 5 章 音楽の聴取が中大脳動脈血流に与える影響

5. 1 背景と目的

研究 1 および研究 2 の結果から、楽譜を見ながら演奏しても、読譜のみでも、暗譜で演奏した時も同程度 MCA_v が増加することが示唆された。一方、演奏という身体活動を伴わないという点で、音楽の聴取は読譜と共通するが、このような音楽の聴取のみでも、脳血流が増加する可能性がある。先行研究では、演奏と聴覚の両課題に伴って、音楽家の運動前野、一次運動野、補足運動野が活性化した (Hund-Georgiadis & Yves Von Cramon, 1999; Meister et al., 2004; Baumann et al., 2005, 2007; Bangert et al., 2006b)。また、ヒトが音楽的特徴を知覚する時、前下内側前頭前野、運動前野、上側頭回前部および後部、下頭頂葉の活性化がみられる (Janata et al., 2002; Patel, 2003)。とはいえ、これらは fMRI や PET での測定であり、音楽の聴取が脳全体の MCA_v に影響を及ぼすか否かは不明である。

また、音楽経験者と非経験者の間で、MCA_v の変化に及ぼす影響に差がある可能性がある。音楽家と非音楽家を対象としたこれまでの研究は、音楽聴取中に非音楽家と比較し音楽家の脳の活動領域が広いことが示されているからである (Bangert et al., 2006a; Angulo-Perkins et al., 2014)。

さらに、同じ音楽聴取であっても、楽曲の調性が MCA_v に影響を与えるかもしれない。先行研究では、主にジャズ、クラシック、ロック、ポピュラーの音楽ジャンルを比較している。これらの音楽ジャンルは、バロック音楽時代（1600 年～1750 年）に確立された、調性音楽が基盤となっている。調性音楽とは、すべての音と和声が、中心となる音（主音）に関連している音楽であり、主音を中心とする音階が存在する。主音は調性の中で安定点を

示す音や和声のことである (Deutsch et al., 1981). 調性は長調と短調の 2 つの音楽体系に分けられる. 音楽ジャンルを比較した先行研究では, MCAv の増加量 (Bernardi et al., 2006) および, 前頭前野の活性化 (Bigliassi et al., 2014) に差がみられることから, 調性音楽の基盤となる, 長調, 短調の違いが脳血流にあたえる可能性がある.

そこで, 本研究では, 音楽の聴取が CBF を増加させるかを, 非音楽家と音楽家とを対象に明らかにすることを目的とした. さらに, 調性音楽の特徴である, 長調・短調の違いが CBF に影響するののかについて検討した.

5. 2 方法

参加者

健常成人 26 名が研究に参加した. そのうち 14 名が非音楽家 (男性 9 名, 女性 5 名, 26 ± 8.4 歳), 12 名が音楽家 (男性 4 名, 女性 8 名, 33 ± 9.6 歳 ヴァイオリニスト 4 名, ピアニスト 8 名) であった. 音楽家は全員がクラシック音楽のトレーニングを受けており, 6 年以上定期的に楽器を演奏していた. 被験者は自律神経系疾患や心臓疾患の既往はなく, 喫煙や薬の服用もなかった. 参加者は全員, この研究の目的と参加に関する説明を受けた後, 書面にて参加に同意した. 本研究は, 東京工業大学人体研究倫理審査委員会の承認を得ている (許可番号: 第 2021087 号).

プロトコル

被験者は, 実験前 6 時間はカフェインの摂取と激しい運動を控え, 実験前 2 時間は食事を控えるよう指示された. 被験者は座位の姿勢で, 動かないように指示された. 被験者に, 長調・短調別に転調した音楽を聴かせた. 試

験曲は映画音楽である、「スーパーマンのテーマ Theme of Superman 作曲：John Towner Williams」(長調)，と「ゴッドファーザー 愛のテーマ Love Theme from The Godfather 作曲：Nino Rota」(短調)であった．長調の曲として，スーパーマンのテーマとゴットファーザーのテーマを長調に移調したもの，短調の曲としてゴットファーザーのテーマとスーパーマンのテーマを短調に移調したものを作製した．試験曲は Studio One Professional (PreSonus 社) を用いて編曲した．それぞれの楽曲は 10 分間であった．コントロールを含めた 3 回の試行の順番は，被験者ごとにランダムにし，試行と試行の間には十分な休息時間を設けた．

測定

MCAv は経頭蓋超音波ドップラー血流計 (WAKI, Atys Medical, St-Genis-Leval, フランス) を用いて測定した，プローブを，ヘッドバンドを介して左側頭部に装着した．血圧は自動血圧計 (UA-704, A&D, 東京) を用いて記録した．

被験者に事後アンケートを提示した．アンケートは次の質問で構成されていた．①実験で使用した音楽を知っていたか．②実験で使用した音楽の映画を知っているか．②の質問に「はい」と答えた被験者には，映画の内容を追加で質問した．

データ分析

データは平均値±標準偏差で表した．安静時，音楽聴取時，回復時の各持続時間の最後の 1 分間の MCAv を解析に使用した．時間と試行の効果および時間と群間の効果を調べるために 2 元配置分散分析で検討した．有意な F

値が得られた場合、安静時、演奏時、回復時の変数を Dunnett の post hoc 検定で比較した。統計的有意水準は $p \leq 0.05$ とした。すべての統計解析に IBM SPSS Statistics 21.0 (IBM Corp., Armonk, ニューヨーク, アメリカ)を使用した。

5. 3 結果

事後のアンケートの結果、12 人の音楽家のうち 10 人と、14 人の非音楽家のうち 9 人が試験の曲を知っていた。ただし、試験曲を知っていると答えた者でも、正確なタイトルを覚えていなかった。映画を知っていると答えた被験者も、映画の内容を詳細に答えられた者はいなかった。また、すべての音楽家が試験曲を演奏した経験がなかった。

MCA_v はコントロール試行で有意な時間の影響はみられなかった。一方、音楽家、非音楽家ともに音楽聴取時の MCA_v に有意な時間の影響がみられた。音楽聴取時の MCA_v は音楽家が、長調（安静時 $0.48 \pm 0.1 \text{ m/s}$ に比較して、音楽聴取時 $0.54 \pm 0.1 \text{ m/s}$, $F=8.56$, $p=0.01$, 14%), 短調(安静時 $0.48 \pm 0.1 \text{ m/s}$ に比較して、音楽聴取時 $0.54 \pm 0.1 \text{ m/s}$, $F=10.87$, $p=0.014$, 11%), 非音楽家が、長調（安静時 $0.49 \pm 0.1 \text{ m/s}$ に比較して、 $0.51 \pm 0.1 \text{ m/s}$, 音楽聴取時 $F=5.04$, $p=0.051$, 8%), 短調（安静時 $0.49 \pm 0.1 \text{ m/s}$ に比較して、音楽聴取時 $0.53 \pm 0.08 \text{ m/s}$, $F=6.64$, $p=0.017$, 9%）で有意に増加した。これらの有意な増加は、回復時には見られなかった。長調と短調の試行間で有意な差はみられなかった（図 8）。

音楽家の MCA_v と非音楽家の MCA_v の増加量を比較した。音楽家の長調と非音楽家の長調（ $F=1.40$, $p=0.248$ ），音楽家の短調と非音楽家の短調（ $F=0.18$, $p=0.676$ ），音楽家のコントロール（ $F=4.90$, $p=0.067$ ），非音楽家

のコントロール($F=0.54$, $p=1$)の間で音楽家と非音楽家の間で有意差はなかった (図 9).

MBP には試行と時間の効果は認められなかった (表 3). 試行間でも同様の結果であった.

5. 4 考察

音楽の聴取が MCA_v に及ぼす影響を検討した. その結果, 音楽の聴取は MCA_v を有意に増加させた. 増加の程度は研究 1 (5~9%), 研究 2 (5~12%) と同程度であった. 長調と短調の試行間, および音楽家と非音楽家の間で MCA_v の増加の程度に有意差はみられなかった. 事後アンケートの結果より, 被験者は試験曲に関する前提の知識がないことがわかった. そのため映画の内容に関する個人的な好みの影響は結果に反映しない. また, 音楽家と非音楽家の間の試験曲に対する慣れが, 交絡因子となる可能性もあったが, すべての音楽家の被験者が, 試験曲の演奏経験がないことから, 慣れの影響はないことが示唆された. 本研究で使用した楽曲は歌詞を伴わないため, 言語処理の影響はない. 「ゴッドファーザー 愛のテーマ Love Theme from The Godfather 作曲: Nino Rota」のみ, 歌詞付きのバージョンがあるが, 本研究では使用しておらず, 被験者はその存在を知らなかった. MCA_v の増加は音楽の聴取を反映した可能性がある.

音楽の聴取に伴う MCA_v の増加は, 楽器演奏に伴う筋活動がなくとも音楽の聴取が関与していることを示唆する. 研究 2 で, 読譜のみでも MCA_v が増加することを報告した. 同様に, 本研究結果も筋活動がない音楽の聴取にも関わらず MCA_v は増加した. 音楽の聴取によってさまざまな脳の活性化が示されている. 先行研究では, 音楽的刺激を知覚した際に, 脳のどの領域

が活性化するか示されている。ハーモニーの知覚には両側頭葉の前部が関与していると考えられる (Satoh et al., 2003)。音楽が時間の進行とともに展開されていくにあたり、継続的に追跡するために、注意記憶や作業記憶が必要である。これは、前頭前野、帯状皮質および下頭頂葉に広がる (Zatorre et al., 1994, Janata et al., 2002)。音楽を聴いたことにより発生する感情の変化には、線条体領域、中脳領域、扁桃体、海馬などの辺縁系ネットワークが関与する (Blood & Zatorre, 2001, Koelsch 2010)。本実験による MCA_v の増加は、音楽の聴取の際に、音楽の展開を追跡することや、ハーモニーやリズムなどの音楽の情報を処理がおこり、これに関連する脳領域が活性化した結果、MCA の血流の増加を引き起こしたと考えられる。

音楽を聴いただけでも運動野が活性化する。それは程度の差はあるが、音楽家にも非音楽家にも同様に起こる。音楽の知覚と演奏等の音楽制作には、音を処理する聴覚皮質や運動を制御する運動皮質など、さまざまな脳領域が関わっており、聴覚野と運動野は神経経路のネットワークで結ばれている

(Zatorre et al., 2007)。その結果、単に音楽を聴くだけでも、運動を司るのと同じ脳領域が活性化する (Zatorre et al., 2007)。音楽を聴くことで、音楽トレーニングを受けていない人でも、運動皮質の領域を活性化できることが示唆されている。Zentgraf らは、手を振っている画像や、物を操作する音などの行動関連刺激に反応する脳活動を fMRI で調査した。その結果、ピアノの鍵盤を押す音などの動作関連の音を聴くと、音楽家と非音楽家の両方で運動皮質が活性化した (Zentgraf et al., 2005)。また、パーキンソン病患者の脳活動に対する音楽鑑賞と運動イメージの効果を調査した研究では、音楽を聴きながら運動動作をイメージすることで、感覚運動野と運動制御に関わる他の脳領域との接続性が高まることが示された (Ilari 2020)。一方

で、Zattore らは、音の高さの変化を聞いたとき、音楽家では運動皮質が活性化したが、非音楽家は活性化しないことを明らかにした (Zattore et al., 1998). これらの証拠は、音楽を聴くことで、音楽トレーニングの有無によって部分的に差はあるが、トレーニングを受けていない人でも、運動皮質の領域を活性化できることを示唆している。

音楽家と非音楽家に、音楽聴取時に活性化する脳領域の違いはあるものの、MCA_v の絶対値には反映されないようである。先行研究では、音楽のトレーニングの有無にかかわらず、音楽鑑賞中に脳の活性化がみられるものの、音楽家の方が活性化の範囲が広い (Halpern & Zatorre, 1999; Blood & Zatorre, 2001; Schmidt & Trainor, 2001). また、音楽やヒトの声など、広範囲の複雑な音刺激に対し、活性化した脳領域を、音楽家と非音楽家で比較すると、音楽家は非音楽家よりも側頭平面が活性化され、上側頭回右後部の活性化も見られた (Angulo-Perkins et al., 2014). 音楽家が音楽鑑賞した際に、非音楽家と比較して、右上および中側頭回、右下前頭回、および左縁上回で広い範囲で活性化する (Seung et al., 2005). また、非音楽家の音楽知覚が右半球優位であり、音楽家は音楽知覚時に側頭葉皮質が左優位の活性化を示した (Ohnishi et al., 2001). これらの違いは、音楽家が、長期にわたり音楽トレーニングおよび音楽を聴く、演奏するという活動をとおして、音楽を処理するための神経ネットワークの範囲が広がることが予想される。本研究における、音楽家と非音楽家の音楽の聴取時の脳血流量が同程度の増加であったことは、先行研究のような違いがあるにもかかわらず、脳血流の絶対値には差が表れるほどではないということを示唆するものである。

音楽家と非音楽家で音楽聴取時に増加する脳血流量の差が見られなかったひとつの要因として、音楽教育の影響が考えられる。本研究の被験者は、何

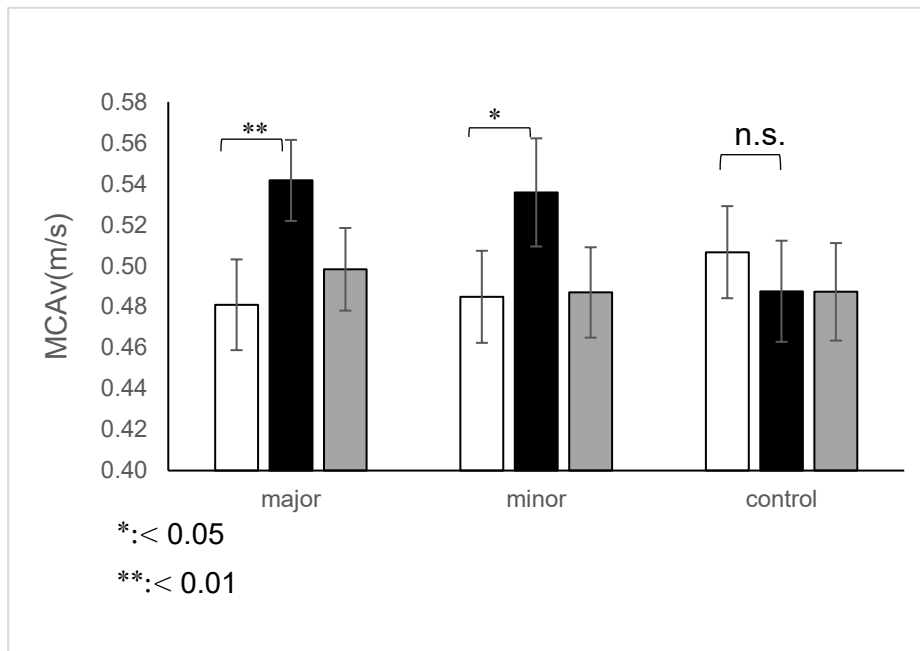
らかの楽器を演奏するための音楽トレーニングはうけていないが、義務教育の中で、少なくとも9年間音楽の授業を受けている。音楽の授業の音楽表現および音楽鑑賞では以下のような力をつける教育活動が行われている。音色、リズム、速度、旋律、テクスチャ、強弱、形式、構成などの音楽を形づくっている要素や要素同士の関連を知覚し、それらの働きが生み出す特質や雰囲気を感じ取る（文部科学省 2017）。また、多様な音楽に対する理解を深め、幅広く主体的に鑑賞する能力を高める（文部科学省 2017）。これらのことを目標に、様々な音楽ジャンルの鑑賞の仕方を学ぶ。以上のような音楽教育を受けてきた結果として、音楽の聴取では音楽経験の有無において差を見出さなかった可能性がある。

本研究の限界には以下の点が挙げられる。本研究は楽器演奏における脳血流増加の因子を解明することを目的としていたため、演奏という身体活動と音楽の聴取を分離した。実際の楽器演奏は、演奏と演奏により発生した音楽の聴取を同時に行っている。本実験は、演奏をおこなっていないので演奏に伴う音楽の聴取とは異なるが、演奏の行動の因子を分離した実験デザイン上、本研究の限界とする。

5. 5 まとめ

音楽の聴取は MCA_v を増加させる。増加の程度は、演奏、読譜と同程度であった。この増加は被験者が音楽家であっても非音楽家であっても同様にみられた。長調の音楽を聴いても短調の音楽を聴いても MCA_v は増加する。

A



B

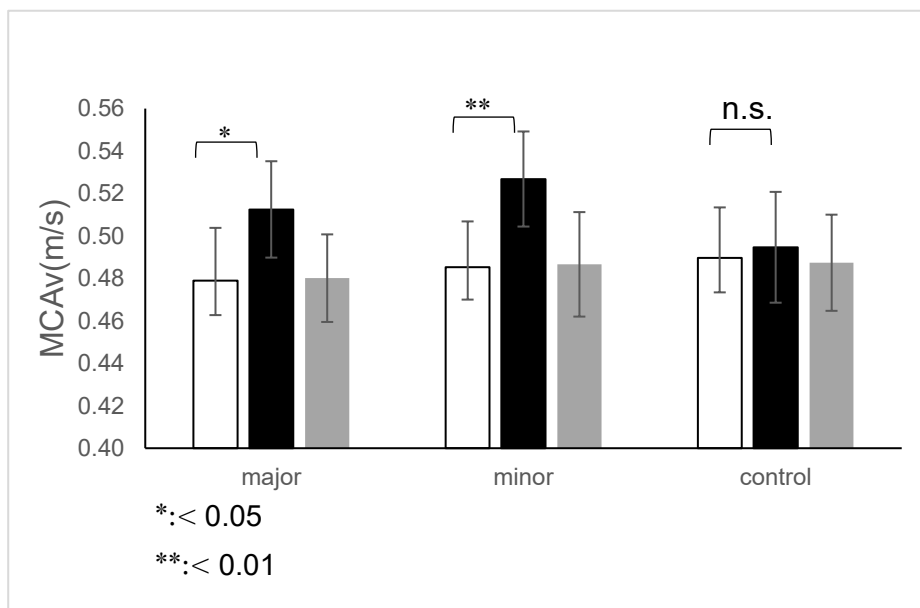


図 8 長調 (major) , 短調 (minor), コントロール (control) における, 音楽家と非音楽家の中大脳動脈血流速度 (MCAv) の平均値

A : 音楽家の MCAv および B : 非音楽家の MCAv を示す. 安静 (白), 音楽聴取 (黒), 回復 (灰色) である. 音楽家, 非音楽家共に major と minor

の音楽聴取時に MCA_v が優位に増加した。Control では増加はみられなかった。 *P < 0.05 vs. rest. **P < 0.05 vs. rest.

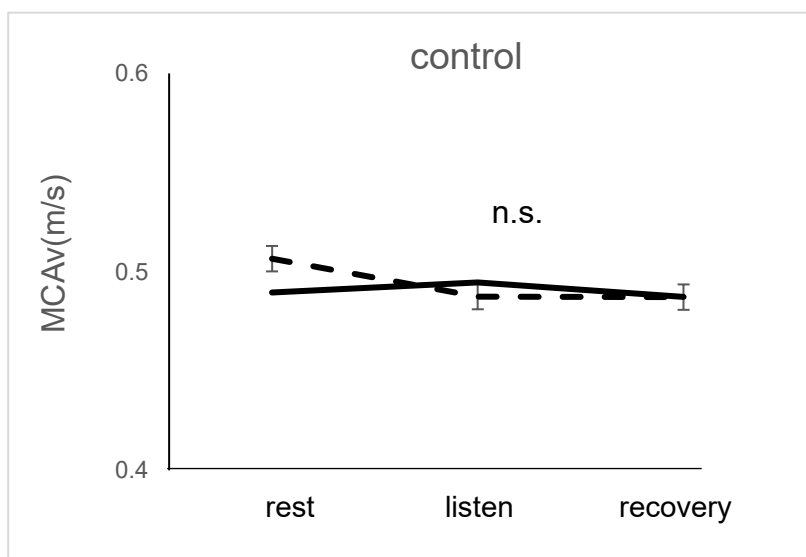
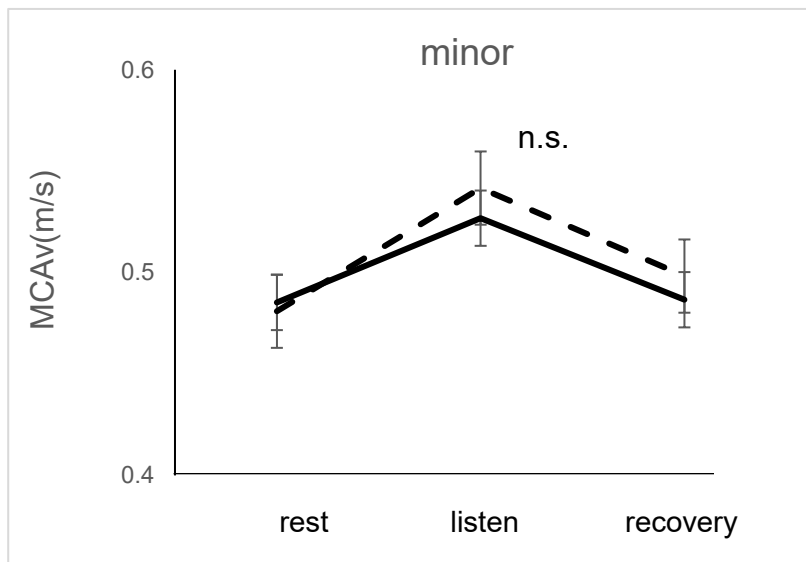
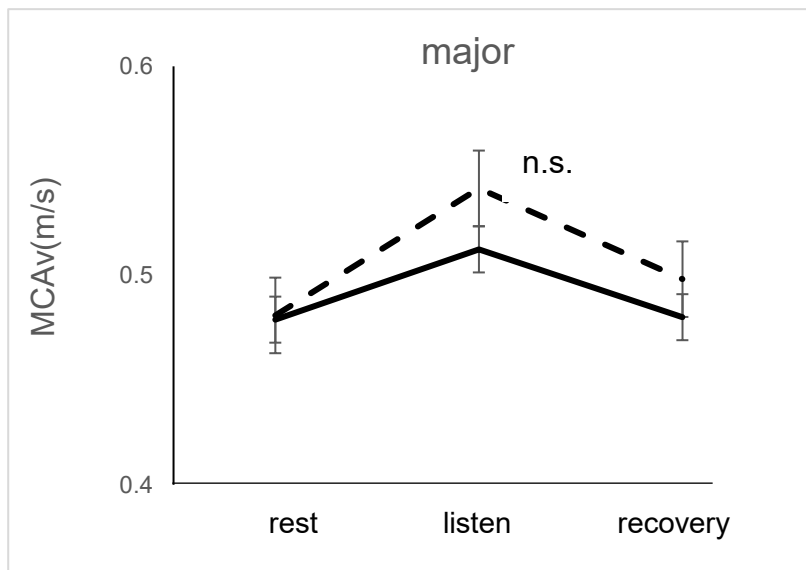


図9 音楽家と非音楽家の中大脳動脈血流速度 (MCA_v) の平均値の比較

各試行における、音楽家の MCA_v および非音楽家の MCA_v の平均値を示す。すべての試行で音楽家と非音楽家の間に有意差はみられなかった。音楽家（点線）、非音楽家（実線）である。

表 3. 安静 (rest), 音楽聴取 (listen), 回復 (recovery) の平均血圧 (MBP)

	MBP (mmHg)		
	rest	listen	recovery
major	85±9	83±9	86±9
minor	88±10	84±10	90±13
control	86±10	86±10	88±11

長調 (major) , 短調 (minor) ,コントロール (control) を示す.

データは平均±標準偏差である. すべての試行で有意差は見られなかった.

第 6 章 音楽刺激と類似の刺激に関する追加実験

背景と目的

本研究では 3 つの実験により、楽器演奏の際に組み合わせる行為である、読譜、演奏動作、聴音に分離し、演奏に伴う行動それぞれが MCA_v の増加を引き起こすことを示した（研究 2，3）。ただし、本研究における刺激（楽器演奏）による MCA_v の増加が、読譜、演奏動作、聴音に音楽の要素が含まれることによるものか、音楽の要素がなくとも、視覚、聴覚、筋肉等を使うことで起こるものなのかは結論することができない。これを検討するためには、音楽と音楽以外の類似の刺激に伴う MCA_v の比較が必要である。そこで、本追加実験では、読譜が音楽の予想を伴うので MCA_v を増加させるのかを検討するため、読書に伴う MCA_v の変化を計測した。また、楽器演奏における運動が MCA_v を増加させる条件であるかを検討するために、単純なフィンガータッピングにおける MCA_v の変化を計測した。

方法

追加実験として 3 つの試行を検討した。①コントロール試行、②読書の試行、③単純なフィンガータッピングであった。②は読譜が MCA_v を増加させる条件であるか、③は楽器演奏における運動が MCA_v を増加させる条件であるかを検討するために行った。被験者は、本研究に賛同を得た男性 3 名、それぞれ 20 代、30 代、50 代であった。被験者は、実験前 6 時間はカフェインの摂取と激しい運動を控え、実験前 2 時間は食事を控えるよう指示された。被験者は座位の姿勢で、動かないように指示された。3 つの試行はそれぞれ 5 分間であった。研究 1，2，3 での試行時間 10 分間のうち、5 分時

点と 10 分時点の MCA_v の平均値が同程度であったことから、本追加実験は 5 分間に設定した。試行の順番は、被験者ごとにランダムとした。

読書の試行では書籍（木下是雄 理科系の作文技術 中央公論新社 1981, 序章）を黙読させた。フィンガータッピングのテンポは、研究 2 と同様の 8 分音符=80 であった。メトロノームでテンポを示し、それに合わせて左右 5 本すべての指を順に動かすように指示した。

結果

すべての被験者において、①コントロール、②読書、③フィンガータッピングの試行中ほとんど変化を示さなかった（図 10）。血圧も変化しなかった（表 4）。

考察

フィンガータッピング、コントロール、読書による MCA_v の変化は認められなかった。研究 1, 2 の結果と比較すると、MCA_v において、読譜では増加がみられ、読書では増加しなかった。演奏とフィンガータッピングでも同様であった。データは 3 名という少ない人数から得られたものであり、統計処理が行われていないので、被験者を増やして追加実験を行うまでは結論を差し控えねばならない。とはいえ、音楽の要素を伴わない読書およびフィンガータッピングが脳血流を増加させると考えるのは不自然であると考えられる。

読書に伴い脳の局所的な活性化が示されているにもかかわらず、MCA_v の増加はみられなかった。PET 研究では、本を黙読した際に、左側頭葉、左眼窩外皮質、左下前頭皮質、中前頭皮質が活性する（Price et al.,1994）。

読書によりもたらされる，これらの脳領域の活性の程度はわずかであるかもしれない．その結果，読書による MCA_v の増加がみられない可能性がある．

ピアノを演奏するように，左右の 5 本の指を使い，タッピングを行っても，ピアノ演奏のような MCA_v の増加はみられなかった．先行研究では，フィンガータッピングに伴い一次運動野の血液量が増加することが示されている (Kuboyama et al., 2004)．fMRI 研究では，左手と右手を別々にフィンガータッピングを行うと，どちらの手でフィンガータッピングを行っても，対側の一次体性感覚野，補足運動野および，同側の小脳前部，後頭部皮質が活性化した (Turesky et al., 2018)．一方，楽器演奏では感覚，運動，聴覚が関与し，統合領域として脳全体に分布している (Wan & Schlaug., 2010 ; Zatorre et al., 2007)．楽器演奏の際に活性化されるネットワークは，背外側，下前頭皮質 (Broca 野を含む)，上側頭回 (Wernicke 野)，辺縁上回，補足運動野，運動前野からなる (Bangert et al., 2006a)．フィンガータッピングと楽器演奏を比較すると，楽器演奏でもたらされる脳の活性化の範囲は，フィンガータッピングより広範囲であると考えられる．楽器演奏とフィンガータッピングにおける脳の活性化の範囲の差が，MCA_v に反映していることが考えられる．

まとめ

音楽と類似する行動である読書およびフィンガータッピングが本研究（実験研究 1，2，3）における MCA_v の増加に貢献した可能性は低いと考えられた．

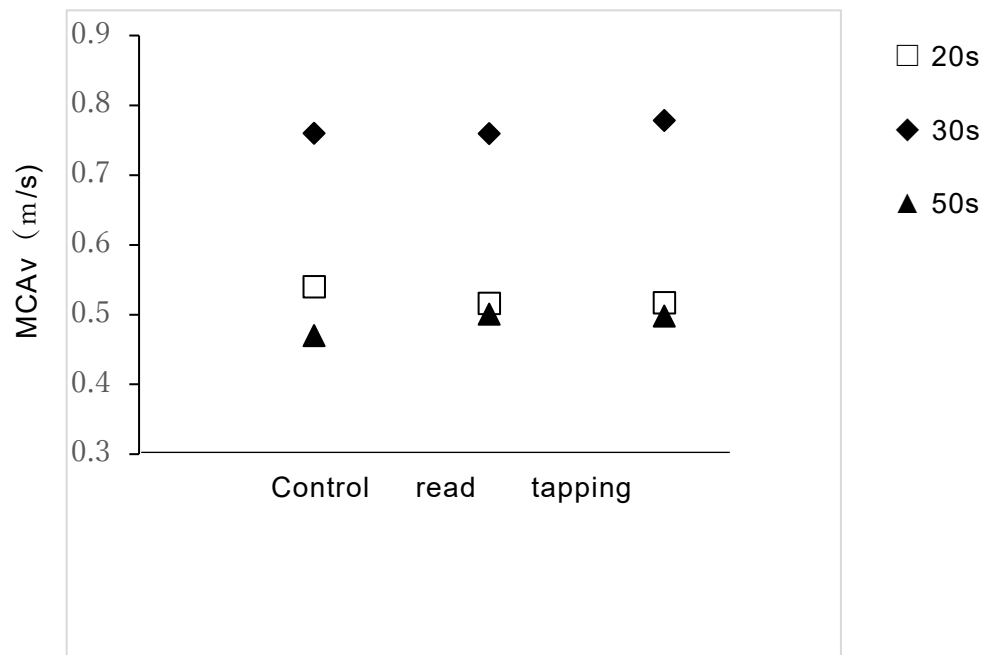


図 10 コントロール，読書，およびフィンガータッピングの際の中大脳動脈血流速度 (MCAv)

各試行における，被験者の MCAv 示す．読書中(read)，フィンガータッピング中(tapping)の MCAv はコントロール(control)とほぼ同程度であった．□（四角）20 代，◆（ひし形）30 代，▲（三角）50 代の被験者の値を示す．

表 4 . 20 代, 30 代, 50 代の被験者の平均血圧 (MBP)

	MBP (mmHg)		
	20s	30s	50s
control	71	82	114
read	78	78	120
tapping	78	83	121

コントロール (control) , 読書 (read) ,フィンガータッピング (tapping) の際の平均血圧を示す.

第7章 結論

7. 1 総合討議

本論文では、①一過性の楽器演奏に伴う中大脳動脈の血流量の変化を明らかにすること、および②楽器演奏中の行動である読譜、演奏動作、聴音が、中大脳動脈血流速度に起こす変化について検討することを目的としていた。これらの観点から、本論文の主要な成果は以下のようにまとめられる。

①一過性の楽器演奏により中大脳動脈の血流量は増加する。研究1と研究2の結果から、増加の程度は安静時の5~12%であった。増加の程度には、演奏曲の難易度および、演奏時の楽譜の有無が影響することが示された。これら結果は、楽器演奏により活性化する脳領域のほとんどがMCAから血液を受け取っているので、理にかなった応答である。fMRIやPETを用いた研究では、楽器演奏時に脳内の血流が増加する領域が明らかにされていた。これに加え、本研究では脳全体の血流量が増加することを明らかにした。②楽器演奏中の行動である読譜、演奏動作という身体活動、演奏に伴う音楽聴取はすべて中大脳動脈血流速度に変化を起こすことが明らかとなった。テンポが八分音符60~80の間では増加の程度が変わらなかった。読譜は指の運動を伴わず、暗譜での演奏は楽譜を読むための視覚処理がない。これらの違いにもかかわらず、MCA_vが増加した。読譜および読譜以外の演奏に伴う行動それぞれがMCA_vの増加を引き起こすことが示唆された。また、追加実験によって、研究1、2、3における結果が音楽を伴うことによるものかを検討した。読譜がMCA_vを増加させる条件であるかを検討するために、読書を、楽器演奏における運動がMCA_vを増加させる条件であるかを検討するために、フィンガータッピングを用いた。結果は読書中およびフィン

ガータッピング中の MCA_v はコントロールと同程度であり、両試行の MCA_v の変化はほとんど認められなかった。楽器演奏および、それに伴う行動は、類似の行動よりも脳血流を増加させる可能性がある。

本研究では、MCA_v は、演奏中に安静時の 5~12% 増加した。一方、自転車エルゴメータ運動中は 10~20% (Sato et al., 2011) であった。本研究 1 において、有酸素エネルギー供給の指標である VO₂ は安静時と比較して増加せず、MCA_v は最大 9 % 増加した (研究 1)。一方、先行研究では、運動中に VO₂ が安静時の 4 倍にまで増加した際に、MCA_v は 20% 増加した (Sato et al., 2011)。運動に比べて演奏は低強度な運動にも関わらず、脳血流量が増加することが明らかになった。

楽器演奏に伴う行動である、読譜、演奏動作、聴音のすべての行動で脳血流が増加した一因として、音楽知覚・処理が行われる脳領域の活性化および、運動野の活性化が考え得る。音楽知覚・処理には、多くの脳領域が活性化する (Särkämö et al., 2013)。例えば、ハーモニーの知覚には両側頭葉の前部が関与していることが示され (Satoh et al., 2003)、音楽を継続的に追跡に必要な、注意記憶や作業記憶には、前頭前野、帯状皮質および下頭頂葉に広がる (Zatorre et al., 1994, Janata et al., 2002)。運動野については、演奏動作は指や腕の運動が、読譜ではイメージにおける仮想的な運動が、聴音では聴覚野と運動野が神経経路のネットワークで結ばれている (Zatorre et al., 2007) ことによりそれぞれ活性化した可能性がある。この 2 つの要因が、楽器演奏により、広範囲に脳領域の活性化を生み、全脳の血流量の増加に寄与した可能性がある。

音楽を演奏するために行う読譜にはいくつか特徴的な点があり、通常の読書とは異なる。音楽家は楽譜に書かれた音符を演奏する少し前に、常に楽譜

を先読みする(Wurtz et al., 2009). また、演奏のテンポを一定に保つために、演奏終了まで厳密な時間規則に従って読譜を続ける (Smith & Jones., 2018). 楽譜に示された音符は、音の高さおよび音を持続する長さの意味が付加されているので、それらを正確に読み解かなければならない. 先行研究では、ピアニストは音符を一音ずつではなく、ひとつのかたまりで読むことが多く、楽譜を読む際には水平方向と垂直方向を組み合わせて読む傾向があることがわかった (van Galen & Reitsma., 1981). また、熟練したピアニストは、和音やフレーズ全体を一度に取り込んで、より全体的に読む傾向にあり、その結果、曲の全体的な和声構造をより効率的に把握することができた (Sloboda et al., 1996). 追加実験の読書では、脳血流が増加せず、読譜では増加した一因として、読譜特有の複雑な活動が脳血流量の増加を引き起こした可能性は高い.

音楽を聴いた時と、そのほかの音を聞いた時の聴覚情報処理には共通する脳領域と、音楽を聴いた時にのみ活性化する脳領域がある (Price et al., 2005).

Angulo-Perkins らは、上側頭回前部に音楽刺激に優先的に反応する領域を報告した. この領域は、音楽の訓練に関係なく存在し、異なる楽器（ヴァイオリン、ピアノ、電子ピアノ）でもみられた (Angulo-Perkins et al., 2014). このような差が生まれる理由として、音楽とそのほかの音には大きく 2 点の違いがあると考察する. 1 点目は音楽の音域の広さである. 音楽の場合、低音域、中音域、高音域のすべてが楽曲の中で用いられる. 一方で、例えば会話の場合、どの言語であっても音楽ほど広い音域をもつ言語はない (Ding et al., 2017). 2 点目に今回用いた西洋音楽は、時間的規則性の中で楽曲が進行する特徴がある. 会話やノイズにはこのような特徴はない. 以上のような、

音楽とそのほかの音との違いは、聴覚情報処理の際にも脳の活動領域に差をもたらす可能性がある。本研究で使用したほぼすべての楽曲は、歌詞を伴わないものであり、言語処理の影響は受けていない。

本研究は、楽器演奏により CBF が増加することを明らかにした。楽器の習得は、視覚、運動感覚、聴覚を高速で交互に処理する高度なスキルが必要であり、演奏中の行動で分離すると、読譜、演奏および、聴音となる。実験研究により、それらすべてが CBF を同程度増加させた。ただし、読譜・演奏・聴音の血流増加量の加算が、楽器演奏の血流増加量と同等になるわけではなかった。

楽器演奏の血流量増加が、読譜・演奏・聴音の血流量増加の加算より低い理由は、以下のように説明されよう。音楽家が楽器演奏をする時の脳活動は非音楽家が楽器演奏する時に比べ、補足運動野と運動野の活動が減少する (Jäncke et al., 2000; Krings et al., 2000)。これは音楽家は演奏経験から、演奏時の複雑な運指や、楽譜を先読みするための目線の配り方、曲の次の展開の予測などに慣れていると考えられる。音楽家は読譜、演奏および、聴音を効率的に行うことで、楽曲の終了まで演奏を継続できる。読譜、演奏、聴音、を分離した本研究は、被験者がひとつひとつの行為に集中することができ、特に読譜と聴音に関しては、演奏の負荷から解放されるため、効率化を測る必要がない。楽器演奏に伴う行為の脳血流の増加が、単に加算的でなかったのはこのような要因が考えられる。

7. 2 研究の限界

本研究は、被験者の演奏経験歴を 6 年以上でコントロールしたものの、完全に音楽能力を一致させるのは困難であり、本研究の限界である。

本研究の限界は、ピアノとヴァイオリンの2種類に限定されていることである。また、運動と違って演奏負荷を統制できない点も限界と言える。

研究1、および研究2では、楽器を実際に演奏できなければならない、楽譜を読めなければならないという条件があるため、音楽家のみを被験者とした。非経験者にもあてはまる研究成果であるとは結論できない。ただし、楽器演奏することにより、非音楽家では音楽家よりも運動野に多くの活動を示す(Jäncke et al., 2000; Krings et al., 2000)ことや、非音楽家が楽譜の読み方や鍵盤楽器を演奏することを学んだ後、頭頂皮質領域の活動に変化が起こる(Stewart et al., 2003, 2004)ことが示されている。非音楽家であっても、本研究と同様に楽器演奏および読譜時に脳血流の増加が起こることが期待できる。

7. 3 今後の展望

本研究で一過性の楽器演奏により脳血流量が増えることが明らかになった。運動は一過性に脳血流量が増やし、その積み重ねの効果としてトレーニングを継続している者の安静時脳血流量が高くなる(Ainslie et al., 2008)。楽器演奏も同様の効果をもたらす可能性が考えられる。今後の研究として、音楽習慣を有する者の脳血流に関する長期的な影響の調査など、縦断研究を行う必要がある。

本研究では、演奏負荷をコントロールした状態で、CBFの増加があったものの血圧に大きな変化を与えなかった。この結果は、運動によりCBFの増加を図りにくい高齢者や障害を持つ人にも、楽器演奏や音楽の聴取が脳血流を維持するための新しい方法として提供できる可能性を有している。

参考文献

- Aiello, R. E., & Sloboda, J. A. (1994). Musical perceptions. Oxford University Press.
- Ainslie, P. N., Cotter, J. D., George, K. P., Lucas, S., Murrell, C., Shave, R., et al. (2008). Elevation in cerebral blood flow velocity with aerobic fitness throughout healthy human ageing. *J. Physiol.* 586, 4005–4010. doi: 10.1113/JPHYSIOL.2008.158279.
- Ainslie, P. N., & Duffin, J. (2009). Integration of cerebrovascular CO₂ reactivity and chemoreflex control of breathing: mechanisms of regulation, measurement, and interpretation. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 296. doi: 10.1152/AJPREGU.91008.2008.
- Ainslie, P. N., & Duffin, J. (2021). Integration of cerebrovascular CO₂ reactivity and chemoreflex control of breathing : mechanisms of regulation , measurement , and interpretation. *Am. J. Physiol.* doi: 10.1152/ajpregu.91008.2008.
- Altenmüller, E., Marco-Pallares, J., Münte, T. F., & Schneider, S. (2009). Neural reorganization underlies improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1169, 395–405. doi: 10.1111/J.1749-6632.2009.04580.X.
- Angulo-Perkins, A., Aubé, W., Peretz, I., Barrios, F. A., Armony, J. L., & Concha, L. (2014). Music listening engages specific cortical regions within the temporal lobes: differences between musicians and non-musicians. *Cortex*. 59, 126–137. doi:

10.1016/J.CORTEX.2014.07.013.

Aoki, T., Furuya, S., and Kinoshita, H. (2005). Finger-tapping ability in male and female pianists and nonmusician controls. *Motor Control* 9, 23–39. doi: 10.1123/MCJ.9.1.23.

Askenfelt, A., & Jansson, E. V. (1992). On vibration sensation and finger touch in stringed instrument playing. *Music Perception*, 9(3), 311–349P

Assal, G., & Buttet, J. (1983). Agraphia and preservation of music writing in a bilingual piano teacher. *Revue Neurologique*, 139(10), 569–574.

Ayotte, J., Peretz, I., Rousseau, I., Bard, C., & Bojanowski, M. (2000). Patterns of music agnosia associated with middle cerebral artery infarcts.

Bailey, D. M., Marley, C. J., Brugniaux, J. V., Hodson, D., New, K. J., Ogoh, S., et al. (2013). Elevated aerobic fitness sustained throughout the adult lifespan is associated with improved cerebral hemodynamics. *Stroke* 44, 3235–3238. doi: 10.1161/STROKEAHA.113.002589.

Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., et al. (2006a). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists : Evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage* 30, 917–926. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.10.044.

Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., et al. (2006b). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjunction.

- Neuroimage* 30, 917–926. doi:
10.1016/J.NEUROIMAGE.2005.10.044.
- Basso, A., & Capitani, E. (1985). Spared musical abilities in a conductor with global aphasia and ideomotor apraxia. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 48(5), 407-412.
- Baumann, S., Koeneke, S., Meyer, M., & Lutz, K. A. I. (2005). A Network for Sensory-Motor Integration What Happens in the Auditory Cortex during Piano Playing without Acoustic Feedback ? 188, 186–188. doi: 10.1196/annals.1360.038.
- 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, 65–78. doi: 10.1016/J.BRAINRES.2007.05.045.
- Bernardi, L., Porta, C., & Sleight, P. (2006). Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of music in musicians and non-musicians: the importance of silence. *Heart* 92, 445–452. doi: 10.1136/HRT.2005.064600.
- Benton, A. L. (1977). The amusias. In *Music and the brain* (pp. 378-397). Butterworth-Heinemann.
- Besson, M., & Schön, D. (2001). Comparison between language and music. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 930, 232–258. doi: 10.1111/J.1749-6632.2001.TB05736.X.
- Bhatnagar, S. C., & Korabic, E. W. (2014). Neuroanatomy and neurophysiology of the central auditory pathways. In *An Introduction*

- to Auditory Processing Disorders in Children* (pp. 15-34).
Psychology Press.
- Bigliassi, M., Barreto-Silva, V., Kanthack, T. F. D., & Altimari, L. R.
(2014). Music and cortical blood flow: A functional near-infrared
spectroscopy (fNIRS) study. *Psychology & Neuroscience*, 7(4), 545.
- Brust, J. C. (1980). Music and language: musical alexia and agraphia.
Brain: a journal of neurology, 103(2), 367-392.
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to
music correlate with activity in brain regions implicated in reward
and emotion. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 98, 11818–11823. doi:
10.1073/PNAS.191355898.
- Brys, M., Brown, C. M., Marthol, H., Franta, R., & Hilz, M. J. (2003).
Dynamic cerebral autoregulation remains stable during physical
challenge in healthy persons. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 285.
doi: 10.1152/AJPHEART.00062.2003.
- Cappelletti, M., Waley-Cohen, H., Butterworth, B., & Kopelman, M.
(2000). A selective loss of the ability to read and to write music.
Neurocase, 6(4), 321-332.
- Chen, J. E., & Glover, G. H. (2015). Functional Magnetic Resonance
Imaging Methods. *Neuropsychol. Rev.* 25, 289–313. doi:
10.1007/S11065-015-9294-9.
- Cook, N. (1994). A guide to musical analysis. Oxford University Press,
USA.
- Cohen, L., Dehaene, S., Chochon, F., Lehéricy, S., & Naccache, L.

- (2000). Language and calculation within the parietal lobe: a combined cognitive, anatomical and fMRI study. *Neuropsychologia* 38, 1426–1440. doi: 10.1016/S0028-3932(00)00038-5.
- Deloche, G., Seron, X., Scius, G., & Segui, J. (1987). Right hemisphere language processing: Lateral difference with imageable and nonimageable ambiguous words. *Brain and Language*, 30(2), 197-205.
- Deppe, M., Ringelstein, E. B., & Knecht, S. (2004). The investigation of functional brain lateralization by transcranial Doppler sonography. *Neuroimage* 21, 1124–1146. doi: 10.1016/j.neuroimage.2003.10.016.
- Deutsch, D., & Feroe, J. (1981).
The internal representation of pitch sequences in tonal music. *Psychological review*, 88(6), 503.
- Ding, N., Patel, A. D., Chen, L., Butler, H., Luo, C., & Poeppel, D. (2017). Temporal modulations in speech and music. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 81, 181–187. doi: 10.1016/J.NEUBIOREV.2017.02.011.
- Erickson, K. I., Hillman, C., Stillman, C. M., Ballard, R. M., Bloodgood, B., Conroy, D. E., et al. Physical Activity, Cognition, and Brain Outcomes: A Review of the 2018 Physical Activity Guidelines HHS Public Access. doi: 10.1249/MSS.0000000000001936.
- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., ... & Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the*

- national academy of sciences, 108(7), 3017-3022.
- Fantini, S., Tgavalekos, K. T., Fantini, S., Sassaroli, A., Tgavalekos, K. T., and Kornbluth, J. (2016). Cerebral blood flow and autoregulation : current measurement techniques and prospects for noninvasive optical methods current measurement techniques and. *Neurophotonics* 3. doi: 10.1117/1.NPh.3.3.031411.
- Foster, B., Bagci, U., Mansoor, A., Xu, Z., and Mollura, D. J. (2014). A review on segmentation of positron emission tomography images. *Comput. Biol. Med.* 50, 76–96. doi: 10.1016/J.COMPBIOMED.2014.04.014.
- Furuya, S., Flanders, M., & Soechting, J. F. (2011). Hand kinematics of piano playing. *J. Neurophysiol.* 106, 2849–2864. doi: 10.1152/JN.00378.2011.
- Galamian, I., & Thomas, S. (2013). *Principles of violin playing and teaching*. Courier Corporation.
- Ghisleni, C., Bollmann, S., Biason-Lauber, A., Poil, S. S., Brandeis, D., Martin, E., ... & O'Gorman, R. L. (2015). Effects of steroid hormones on sex differences in cerebral perfusion. *PLoS One*, 10(9), e0135827.
- Giller, C. A., Lam, M., & Roseland, A. (1993). Periodic Variations in Transcranial Doppler Mean Velocities. *J. Neuroimaging* 3.3, 160–162.
- Goebl, W., Bresin, R., & Galembo, A. (2005). Touch and temporal behavior of grand piano actions. *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 1154–1165. doi: 10.1121/1.1944648.

- Godefroy, O., Leys, D., Furby, A., De Reuck, J., Daems, C., Rondepierre, P., ... & Desaulty, A. (1995). Psychoacoustical deficits related to bilateral subcortical hemorrhages a case with apperceptive auditory agnosia. *Cortex*, 31(1), 149-159.
- Gorelick, P. B., Scuteri, A., Black, S. E., DeCarli, C., Greenberg, S. M., Iadecola, C., ... & Seshadri, S. (2011). Vascular contributions to cognitive impairment and dementia: a statement for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *stroke*, 42(9), 2672-2713.
- Gosselin, N., Peretz, I., Johnsen, E., & Adolphs, R. (2007). Amygdala damage impairs emotion recognition from music. *Neuropsychologia* 45, 236–244. doi: 10.1016/J.NEUROPSYCHOLOGIA.2006.07.012.
- Grahn, J. A., & Rowe, J. B. (2009). Feeling the beat: premotor and striatal interactions in musicians and nonmusicians during beat perception. *Journal of Neuroscience*, 29(23), 7540-7548.
- Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2006). Textbook of medical physiology (11th ed.). Saunders/Elsevier.
- Halpern, A. R., & Zatorre, R. J. (1999). When that tune runs through your head: a PET investigation of auditory imagery for familiar melodies. *Cereb. Cortex* 9, 697–704. doi: 10.1093/CERCOR/9.7.697.
- Hanna-Pladdy, B., & Mackay, A. (2011). The Relation Between Instrumental Musical Activity and Cognitive Aging. doi: 10.1037/a0021895.
- Haslinger, B., Erhard, P., Altenmu, E., Hennenlotter, A., Schwaiger, M.,

- Gra, H., et al. (2004). Reduced Recruitment of Motor Association Areas During Bimanual Coordination in Concert Pianists. *Hum. Brain Mapp.* 215, 206–215. doi: 10.1002/hbm.20028.
- Hébert, S., & Cuddy, L. L. (2006). Music-reading deficiencies and the brain. *Advances in Cognitive Psychology*, 2(2), 199.
- Hofmann, A., & Goebel, W. (2016). Finger forces in clarinet playing. *Frontiers in psychology*, 7, 1140.
- Hund-Georgiadis, M., & Yves Von Cramon, D. (1999). Motor-learning-related changes in piano players and non-musicians revealed by functional magnetic-resonance signals. *Exp. brain Res.* 125, 417–425. doi: 10.1007/S002210050698.
- Ilari, B. (2020). Music listening and motor imagery promote sensorimotor circuit connectivity in Parkinson's disease. *Frontiers in Neurology*, 11, 1096.
- Janata, P., Birk, J. L., Van Horn, J. D., Leman, M., Tillmann, B., & Bharucha, J. J. (2002). The cortical topography of tonal structures underlying Western music. *Science* 298, 2167–2170. doi: 10.1126/SCIENCE.1076262.
- Janata, P., Tomic, S. T., & Rakowski, S. K. (2007). Characterisation of music-evoked autobiographical memories. *Memory*, 15(8), 845-860.
- Jäncke, L., Shah, N. J., & Peters, M. (2000). Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists. *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 10, 177–183. doi: 10.1016/S0926-6410(00)00028-8.

- Jorgensen, L. G., Perko, M., Hanel, B., Schroeder, T. V., & Secher, N. H. (1992). Middle cerebral artery flow velocity and blood flow during exercise and muscle ischemia in humans. *J. Appl. Physiol.* 72, 1123–1132. doi: 10.1152/JAPPL.1992.72.3.1123.
- Joyce, W., White, D. W., Raven, P. B., & Wang, T. (2019a). Weighing the evidence for using vascular conductance, not resistance, in comparative cardiovascular physiology. *J. Exp. Biol.* 222. doi: 10.1242/jeb.197426.
- Joyce, W., White, D. W., Raven, P. B., & Wang, T. (2019b). Weighing the evidence for using vascular conductance, not resistance, in comparative cardiovascular physiology. *J. Exp. Biol.* 222. doi: 10.1242/JEB.197426.
- Kawasaki, A., & Hayashi, N. (2022). Playing a musical instrument increases blood flow in the middle cerebral artery. *PLoS One* 17. doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0269679.
- Kawasaki, A., & Hayashi, N. (2022). Musical instrumental reading affects middle cerebral blood flow and cognitive function. *Frontiers in Physiology*, 1738.
- Kingwell, B. A. (2000). Nitric oxide - mediated metabolic regulation during exercise: effects of training in health and cardiovascular disease. *The FASEB journal*, 14(12), 1685-1696.
- Kinoshita, H., Furuya, S., Aoki, T., & Altenmüller, E. (2007). Loudness control in pianists as exemplified in keystroke force measurements on different touches. *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 2959–2969. doi:

10.1121/1.2717493.

Kirkham, F. J., Padayachee, T. S., Parsons, S., Seargeant, L. S., House, F. R., & Gosling, R. G. (1986). Transcranial measurement of blood velocities in the basal cerebral arteries using pulsed Doppler ultrasound: velocity as an index of flow. *Ultrasound Med. Biol.* 12, 15–21. doi: 10.1016/0301-5629(86)90139-0.

Kochevitsky, G. (1995). The art of piano playing: *A scientific approach*. Alfred Music.

Koelsch, S. (2011). Toward a neural basis of music perception—a review & updated model. *Frontier in Psychology*, 2, 110.

Krings, T., Töpper, R., Foltys, H., Erberich, S., Sparing, R., Willmes, K., et al. (2000). Cortical activation patterns during complex motor tasks in piano players and control subjects. A functional magnetic resonance imaging study. *Neurosci. Lett.* 278, 189–193. doi: 10.1016/S0304-3940(99)00930-1.

Kuboyama, N., Nabetani, T., Shibuya, K. I., Machida, K., & Ogaki, T. (2004). The Effect of Maximal Finger Tapping on Cerebral Activation. *J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci.* 23, 105–110. doi: 10.2114/JPA.23.105.

Langheim, F. J. P., Callicott, J. H., Mattay, V. S., Duyn, J. H., and Weinberger, D. R. (2002). Cortical systems associated with covert music rehearsal. *Neuroimage* 16, 901–908. doi: 10.1006/NIMG.2002.1144.

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, 9632–9639. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2254-08.2008.
- Lassen, N. A. (1959). Cerebral blood flow and oxygen consumption in man. *Physiological reviews*, 39(2), 183-238.
- Lee, H. L., & Noppeney, U. (2011). Long-term music training tunes how the brain temporally binds signals from multiple senses. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 108. doi: 10.1073/PNAS.1115267108.
- Lucas, S. J., Ainslie, P. N., Murrell, C. J., Thomas, K. N., Franz, E. A., & Cotter, J. D. (2012). Effect of age on exercise-induced alterations in cognitive executive function: relationship to cerebral perfusion. *Experimental gerontology*, 47(8), 541-551.
- Luria, A. R., Tsvetkova, L. S., & Futer, D. S. (1965). Aphasia in a composer. *Journal of the neurological sciences*, 2 (3), 288-292.
- Madsen, P. L., Sperling, B. K., Warming, T., Schmidt, J. F., Secher, N. H., Wildschiodtz, G., et al. (1993). Middle cerebral artery blood velocity and cerebral blood flow and O₂ uptake during dynamic exercise. *J. Appl. Physiol.* 74, 245–250. doi: 10.1152/JAPPL.1993.74.1.245.
- Maestre, E., Bonada, J., Blaauw, M., Pérez, A., & Gaus, E. (2007). Acquisition of violin instrumental gestures using a commercial EMF tracking device. *Int. Comput. Music Conf. ICMC 2007*, 386–393.
- Markwalder, T. M., Grolimund, P., Seiler, R. W., Roth, F., & Aaslid, R. (1984). Dependency of blood flow velocity in the middle cerebral

- artery on end-tidal carbon dioxide partial pressure--a transcranial ultrasound Doppler study. *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 4, 368–372. doi: 10.1038/JCBFM.1984.54.
- Marsden, K. R., Haykowsky, M. J., Smirl, J. D., Jones, H., & Nelson, M. D. (2012). Aging blunts hyperventilation-induced hypocapnia and reduction in cerebral blood flow velocity during maximal exercise. *Am. Aging Assoc.*, 725–735. doi: 10.1007/s11357-011-9258-9.
- McFarland, H. R., & Fortin, D. (1982). Amusia due to right temporoparietal infarct. *Archives of Neurology*, 39 (11), 725-727.
- Meister, I. G., Krings, T., Foltys, H., Boroojerdi, B., Müller, M., Töpper, R., et al. (2004). Playing piano in the mind - An fMRI study on music imagery and performance in pianists. *Cogn. Brain Res.* 19, 219–228. doi: 10.1016/j.cogbrainres.2003.12.005.
- Mendez, M. (2001). Generalized auditory agnosia with spared music recognition in a lefthander: Analysis of a case with a right temporal stroke. *Cortex*, 37, 139–150.
- Møller, A. R. (2012). *Hearing: anatomy, physiology, and disorders of the auditory system*. Plural Publishing.
- Moraine, J. J., Lamotte, M., Berr, J., Niset, G., Leduc, A., & Naeije, R. (1993). Applied Physiology Relationship of middle cerebral artery blood flow velocity to intensity during dynamic exercise in normal subjects. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 35–38.
- Murayama, J., Kashiwagi, T., Kashiwagi, A., & Mimura, M. (2004). Impaired pitch production and preserved rhythm production in a

- right brain-damaged patient with amusia. *Brain and Cognition*, 56(1), 36-42.
- Musacchia, G., Sams, M., Skoe, E., & Kraus, N. (2007). Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 104, 15894–15898. doi: 10.1073/PNAS.0701498104.
- Narayan, V., Mohammed, N., Savardekar, A. R., Patra, D. P., Notarianni, C., & Nanda, A. (2018). Noninvasive Intracranial Pressure Monitoring for Severe Traumatic Brain Injury in Children: A Concise Update on Current Methods. *World Neurosurg.* 114, 293–300. doi: 10.1016/j.wneu.2018.02.159.
- Netter, F. H. (2014). *Atlas of human anatomy, Professional Edition E-Book: including NetterReference. com Access with full downloadable image Bank*. Elsevier health sciences.
- Ogoh, S., & Ainslie, P. N. (2009). Regulatory mechanisms of cerebral blood flow during exercise: new concepts. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 37, 123–129. doi: 10.1097/JES.0B013E3181AA64D7.
- Ogoh, S., & Ainslie, P. N. (2021). Cerebral blood flow during exercise : mechanisms of regulation. *J. Appl. Physiol.*, 1370–1380. doi: 10.1152/jappphysiol.00573.2009.
- Ogoh, S., Brothers, R. M., Barnes, Q., Eubank, W. L., Hawkins, M. N., Purkayastha, S., ... & Raven, P. B. (2005). The effect of changes in cardiac output on middle cerebral artery mean blood velocity at rest and during exercise. *The Journal of physiology*, 569(2), 697-704.

- Ogoh, S., Fadel, P. J., Zhang, R., Selmer, C., Jans, Ø., Secher, N. H., et al. (2005). Middle cerebral artery flow velocity and pulse pressure during dynamic exercise in humans. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 288. doi: 10.1152/AJPHEART.00979.2004.
- Ogoh, S., & Tarumi, T. (2019). Cerebral blood flow regulation and cognitive function: a role of arterial baroreflex function. *J. Physiol. Sci.* 69, 813–823. doi: 10.1007/S12576-019-00704-6.
- Ohnishi, T., Matsuda, H., Asada, T., Aruga, M., Hirakata, M., Nishikawa, M., et al. (2001). Functional anatomy of musical perception in musicians. *Cereb. Cortex* 11, 754–760. doi: 10.1093/CERCOR/11.8.754.
- Oken, B. S., Zajdel, D., Kishiyama, S., Flegal, K., Dehen, C., Haas, M., et al. (2006). RANDOMIZED, CONTROLLED, SIX-MONTH TRIAL OF YOGA IN HEALTHY SENIORS: EFFECTS ON COGNITION AND QUALITY OF LIFE. *Altern. Ther. Health Med.* 12, 40. Available at: /pmc/articles/PMC1457100/ [Accessed June 2, 2022].
- Palmer, C. (1997). Music performance. *Annual review of psychology*, 48(1), 115-138.
- Panerai, R. B. (2008). Cerebral autoregulation: from models to clinical applications. *Cardiovasc. Eng.* 8, 42–59. doi: 10.1007/S10558-007-9044-6.
- 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, 143–150. doi: 10.1111/J.1749-

6632.2009.04588.X.

- Parsons, L. M., Sergent, J., Hodges, D. A., & Fox, P. T. (2005). The brain basis of piano performance. *Neuropsychologia* 43, 199–215. doi: 10.1016/J.NEUROPSYCHOLOGIA.2004.11.007.
- Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nat. Neurosci.* 6, 674–681. doi: 10.1038/NN1082.
- Peebles, K., Celi, L., McGrattan, K., Murrell, C., Thomas, K., & Ainslie, P. N. (2007). Human cerebrovascular and ventilatory CO₂ reactivity to end-tidal, arterial and internal jugular vein PCO₂. *J. Physiol.* 584, 347–357. doi: 10.1113/JPHYSIOL.2007.137075.
- Peretz, I. (1996). Can we lose memory for music? A case of music agnosia in a nonmusician. *Journal of Cognitive neuroscience*, 8 (6), 481-496.
- Peretz, I. (1990). Processing of local and global musical information by unilateral brain-damaged patients. *Brain* 113 (Pt 4), 1185–1205. doi: 10.1093/BRAIN/113.4.1185.
- Peretz, I., Belleville, S., & Fontaine, S. (1997). Dissociations between music and language functions after cerebral resection: a new case of amusia without aphasia. *Canadian journal of experimental psychology= Revue canadienne de psychologie experimentale*, 51(4), 354-368.
- 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, 58–75. doi: 10.1196/ANNALS.1284.006.
- Peretz, I., Kolinsky, R., Tramo, M., Labrecque, R., Hublet, C.,

- Demeurisse, G., & Belleville, S. (1994). Functional dissociations following bilateral lesions of auditory cortex. *Brain*, 117(6), 1283-1301.
- Peretz, I., & Zatorre, R. J. (2005). Brain organization for music processing. *Annu. Rev. Psychol.*, 56, 89-114.
- Platel, H., Baron, J. C., Desgranges, B., Bernard, F., & Eustache, F. (2003). Semantic and episodic memory of music are subserved by distinct neural networks. *Neuroimage*, 20 (1), 244-256.
- Platel, H., Price, C., Baron, J. C., Wise, R., Lambert, J., Frackowiak, R. S. J., et al. (1997). The structural components of music perception. A functional anatomical study. *Brain* 120 (Pt 2), 229–243. doi: 10.1093/BRAIN/120.2.229.
- Price, C., Thierry, G., & Griffiths, T. (2005). Speech-specific auditory processing: where is it? *Trends Cogn. Sci.* 9, 271–276. doi: 10.1016/J.TICS.2005.03.009.
- Price, C. J., Wise, R. J. S., Watson, J. D., Patterson, K., Howard, D., & Frackowiak, R. S. J. (1994). Brain activity during reading The effects of exposure duration and task. *Brain*, 117(6), 1255-1269.
- Querido, J. S., & Sheel, A. W. (2007). Regulation of cerebral blood flow during exercise. *Sports Med.* 37, 765–782. doi: 10.2165/00007256-200737090-00002.
- Rangel-Castilla, L., Gasco, J., Nauta, H. J. W., Okonkwo, D. O., & Robertson, C. S. (2008). Cerebral pressure autoregulation in traumatic brain injury. *Neurosurg. Focus* 25. doi:

10.3171/FOC.2008.25.10.E7.

Robba, C., Cardim, D., Sekhon, M., Budohoski, K., & Czosnyka, M.

(2018). Transcranial Doppler: a stethoscope for the brain-neurocritical care use. *J. Neurosci. Res.* 96, 720–730. doi: 10.1002/jnr.24148.

Roux, F. E., Lubrano, V., Lotterie, J. A., Giussani, C., Pierroux, C., &

Démonet, J. F. (2007). When “abegg” is read and (“A, B, E, G, G”) is not: a cortical stimulation study of musical score reading. *J. Neurosurg.* 106, 1017–1027. doi: 10.3171/JNS.2007.106.6.1017.

Särkämö, T., Tervaniemi, M., & Huotilainen, M. (2013). Music

perception and cognition: development, neural basis, and rehabilitative use of music. *Wiley Interdiscip. Rev. Cogn. Sci.* 4, 441–451. doi: 10.1002/WCS.1237.

Särkämö, T., Tervaniemi, M., Laitinen, S., Forsblom, A., Soinila, S.,

Mikkonen, M., et al. (2008). Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain* 131, 866–876. doi: 10.1093/brain/awn013.

Särkämö, T., Tervaniemi, M., Soinila, S., Autti, T., Silvennoinen, H. M.,

Laine, M., et al. (2009). Amusia and Cognitive Deficits after Stroke. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1169, 441–445. doi: 10.1111/J.1749-6632.2009.04765.X.

Sato, K., Ogoh, S., Hirasawa, A., Oue, A., & Sadamoto, T. (2011). The

distribution of blood flow in the carotid and vertebral arteries during dynamic exercise in humans. *J. Physiol.* 11, 2847–2856. doi:

10.1113/jphysiol.2010.204461.

Satoh, M., Takeda, K., Nagata, K., Hatazawa, J., & Kuzuhara, S. (2003).

The anterior portion of the bilateral temporal lobes participates in music perception: a positron emission tomography study. *American Journal of Neuroradiology*, 24(9), 1843-1848.

Schmidt, L. A., & Trainor, L. J. (2001). Frontal brain electrical activity (EEG) distinguishes valence and intensity of musical emotions. *Cognition & Emotion*, 15(4), 487-500.

Schön, D., Anton, J. L., Roth, M., & Besson, M. (2002). An fMRI study of music sight-reading. *Neuroreport* 13, 2285–2289. doi: 10.1097/00001756-200212030-00023.

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

Sergent, J., Zuck, E., Terriah, S., & Macdonald, B. (1992a). Distributed Neural Network Underlying Musical Sight-Reading and Keyboard Performance. *Science* (80-.). 2593, 1–4.

Sergent, J., Zuck, E., Terriah, S., & MacDonald, B. (1992b). Distributed Neural Network Underlying Musical Sight-Reading and Keyboard Performance. *Science* (80-.). 257, 106–109. doi: 10.1126/SCIENCE.1621084.

Serrador, J. M., Picot, P. A., Rutt, B. K., Shoemaker, J. K., Bondar, R. L., Serrador, J. M., et al. (2000). MRI Measures of Middle Cerebral Artery Diameter in Conscious Humans During Simulated

- Orthostasis. *Stroke Am. Hear. Assoc.*, 1672–1678. doi:
10.1161/01.STR.31.7.1672.
- Seung, Y., Kyong, J. S., Woo, S. H., Lee, B. T., & Lee, K. M. (2005).
Brain activation during music listening in individuals with or without
prior music training. *Neurosci. Res.* 52, 323–329. doi:
10.1016/J.NEURES.2005.04.011.
- Shibasaki, H., Sadato, N., Lyshkow, H., Yonekura, Y., Honda, M.,
Nagamine, T., et al. (1993). Both primary motor cortex and
supplementary motor area play an important role in complex finger
movement. *Brain*, 1387–1398.
- Smith, J., & Jones, K. (2018). Strict Time Rules in Reading Music: The
Effects of Timing Constraints on Perception and Performance. *Music
Perception: An Interdisciplinary Journal*, 35(2), 189-203. doi:
10.1525/mp.2018.35.2.189
- Smith, K. J., Wong, L. E., Eves, N. D., Koelwyn, G. J., Smirl, J. D., Willie,
C. K., et al. (2012). Respiratory Physiology & Neurobiology Regional
cerebral blood flow distribution during exercise : Influence of oxygen.
Respir. Physiol. Neurobiol. 184, 97–105. doi:
10.1016/j.resp.2012.07.014.
- Sloboda, J. A., Davidson, J. W., Howe, M. J., & Moore, D. G. (1996). The
role of practice in the development of performing musicians. *British
Journal of Psychology*, 87(2), 287-309.
- Stanzione, M., Grossi, D. & Roberto, L. Note-by-Note Music Reading: A
Musician with Letter-by-Letter Reading. *Music Perc.* 7, 273-284

- (1990).
- Stewart, L., Henson, R., Kampe, K., Walsh, V., Turner, R., & Frith, U. (2003). Brain changes after learning to read and play music. *Neuroimage* 20, 71–83. doi: 10.1016/S1053-8119(03)00248-9.
- Stewart, L., Walsh, V., & Frith, U. (2004). Reading music modifies spatial mapping in pianists. *Percept. Psychophys.* 66, 183–195. doi: 10.3758/BF03194871.
- Tschakovsky, M. E., & Joyner, M. J. (2008). Nitric oxide and muscle blood flow in exercise. *Applied physiology, nutrition, and metabolism*, 33(1), 151-160.
- Turesky, T. K., Olulade, O. A., Luetje, M. M., & Eden, G. F. (2018). An fMRI study of finger tapping in children and adults. *Human brain mapping*, 39(8), 3203-3215.
- Tzeng, Y. C., Lucas, S. J. E., Atkinson, G., Willie, C. K., & Ainslie, P. N. (2010). Fundamental relationships between arterial baroreflex sensitivity and dynamic cerebral autoregulation in humans. *J. Appl. Physiol.* 108, 1162–1168. doi: 10.1152/JAPPLPHYSIOL.01390.2009.
- Valdueza, M., Balzer, O., Villringer, A., Vogl, T. J., Kutter, R., & Einha, K. M. (1929). Changes in Blood Flow Velocity and Diameter of the Middle Cerebral Artery during Hyperventilation : Assessment with MR and Transcranial Doppler Sonography. *Am. J. Neuroradiol.*, 1929–1934.
- Van Beek, A. H., Claassen, J. A., Rikkert, M. G. O., & Jansen, R. W. (2008). Cerebral autoregulation: an overview of current concepts and

- methodology with special focus on the elderly. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 28(6), 1071-1085.
- van Galen, G. P., & Reitsma, P. (1981). Reading music: Horizontal or vertical?. *Acta Psychologica*, 47(3), 241-252.
- Wan, C. Y., & Schlaug, G. (2010). Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span. *The Neuroscientist*, 16(5), 566-577.
- Webster, D. B. (1992). An overview of mammalian auditory pathways with an emphasis on humans. *The mammalian auditory pathway: Neuroanatomy*, 1-22.
- Willie, C. K., Macleod, D. B., Shaw, A. D., Smith, K. J., Tzeng, Y. C., Eves, N. D., & Ikeda, K. (2012). Regional brain blood flow in man during acute changes in arterial blood gases. *The Journal of physiology*, 590(14), 3261-3275. doi: 10.1113/jphysiol.2012.230011
- Witte, E., Liu, Y., Ward, J. L., Kempf, K. S., Whitaker, A., Vidoni, E. D., et al. (2019). Exercise intensity and middle cerebral artery dynamics in humans. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 262, 32–39. doi: 10.1016/J.RESP.2019.01.013.
- Wurtz, P., Mueri, R. M., & Wiesendanger, M. (2009). Sight-reading of violinists: eye movements anticipate the musical flow. *Exp. brain Res.* 194, 445–450. doi: 10.1007/S00221-009-1719-3.
- Zatorre, R. J. (1984). Musical perception and cerebral function: A critical review. *Music Perception*, 2 (2), 196-221.
- Zatorre, R. J., Perry, D. W., Beckett, C. A., Westbury, C. F., & Evans, A.

- C. (1998). The influence of musical training on the representation of tone height in the human brain. *Cerebral cortex*, 8(3), 199-205.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., & Meyer, E. (1994). Neural mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *Journal of neuroscience*, 14 (4), 1908-1919.
- 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, 547–558. doi: 10.1038/nrn2152.
- Zentgraf, E., Doppelmayr, M., & Koppes, T. (2005). Motor cortex activation during the perception of action-related stimuli: An fMRI study. *Brain research*, 1065(1-2), 115-126.
- Zlokovic, B. V. (2005). Neurovascular mechanisms of Alzheimer's neurodegeneration. *Trends in neurosciences*, 28(4), 202-208.
- 文部科学省. (2017). 小学校学習指導要領解説 音楽編. 東京: 教育芸術社.
- 文部科学省. (2017). 中学校学習指導要領解説 音楽編. 東京: 教育芸術社.

研究業績

成果・実績（学会発表・論文提出・掲載状況など）		
年月日 （西暦）	内容	成果・活動
2018年9月7日	第73回体力医学大会学会発表	Playing an instrument increases blood flow in middle cerebral artery. （ポスター発表）
2020年9月25日	第75回体力医学大会学会発表	Effects of playing an instrument on cerebral blood flow and cognitive function. （ポスター発表）
2022年6月8日	学術雑誌発表論文	Kawasaki, A., & Hayashi, N. (2022). Playing a musical instrument increases blood flow in the middle cerebral artery. PloS one, 17(6), e0269679. (査読有り)
2022年7月12日	学術雑誌発表論文	Kawasaki, A., & Hayashi, N. (2022). Musical instrumental reading affects middle cerebral blood flow and cognitive function. Frontiers in Physiology, 1738. (査読有り)

助成取得の状況（過去・現在の奨学金，助成金の取得状況）		
年月日 （西暦）	名称	助成機関・団体
2019年9月1日	YAMAHA研究活動 支援助成	ヤマハ音楽振興会（共同研究者）
2020年4月1日	つばめ博士学生奨学金	東京工業大学
2021年4月1日	つばめ博士学生奨学金 特別奨学金	東京工業大学
2021年11月2 日	イノベーションデザイン プラットフォーム （Idp）GAPファンド	JST社会還元加速プログラム （SCORE）大学推進型 （拠点都市環境整備型）
2021年11月 17日	殻を破るぞ！越境型理 工系博士人材育成 プロジェクト	JST次世代研究者挑戦的研究 プログラム
2022年3月30 日	Tokyo Tech Start up Challenge 2022	東京工業大学

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの貴重な時間を費やし懇切なるご指導と有益な示唆を受け賜りました。早稲田大学 スポーツ科学学術院 林 直亨教授に心から感謝を申し上げます。林先生は音楽の経歴しかなかった私に、音楽と生理学を掛け合わせた新しい研究のアイデアをくださいました。一から論文の読み方、書き方、研究の進め方を教えていただき、そしてなにより研究の面白さを教えていただきました。本博士論文を執筆できたのも、先生の熱心なご指導とご支援のおかげです。本当にありがとうございました。

東京工業大学 リベラルアーツ研究教育院 高橋将記准教授に厚く感謝を申し上げます。高橋先生は、外部研究資金の獲得や、幅広い実験研究への挑戦を応援してくださいました。論文の執筆や研究に行き詰まった時も、温かいお言葉や、先生自身が研究を楽しんでいる姿勢に何度も背中を押されました。研究を行う者として視野が広がったのも、先生の多大なるご支援と的確なご助言に他なりません。心より、お礼を申し上げます。

本論文の作成にあたり、審査委員として多くの建設的なご助言をいただきました。室田真男教授、佐久間邦弘教授、駒田 陽子教授、永岑 光恵教授には心より感謝申し上げます。修士課程より温かく見守っていただき、研究のみならず授業の中でも多くのご助言をいただきましたこと、厚くお礼を申し上げます。

中島岳志教授は、審査の過程でなかなか前に進めなかった際に、温かい言葉で励ましてくださいました。最後までやり遂げることができたのも、中島先生に精神面で支えていただいたのおかげです。

高橋研究室の藤平 杏子さん、金子 亜也子さん、島村京さん、王春弋さん、

田原敦志さん、酒井哲志さん、福家冨佳さん、および林研究室の先輩である濱田有香さんからは、多岐に渡りアドバイスやサポートをいただきました。藤平 杏子さんには、研究に対するまじめで覚悟のある姿勢を間近で見ることができました。質疑応答などの実践的なサポートもしてくださり、本当に多くを学ばせていただきました。金子 亜也子さんには、研究が円滑に進むよう力添えいただきました。心強い子育てのアドバイスや研究と家庭の両立の難しさで迷いが生じる時もいつも支えてくださいました。濱田有香さんには、博士論文執筆に対してのご指導と、執筆を乗り越えるための温かいお言葉とアドバイスをいただきました。支えて下さったみなさまに、心よりお礼申し上げます。

博士課程の仲間である、鈴木悠理さん、高木良子さんには大変お世話になりました。鈴木悠理さんの存在があったからお互いに切磋琢磨し合い、励まし合い、研究に打ち込むことができました。高木良子さんは、審査の過程で落ち込んだ際に手を差し伸べて励ましてくださいました。お二人に心よりお礼申し上げます。

本研究には、5年間にわたり、多くの被験者に参加していただきました。研究への協力に感謝申し上げます。

本研究の一部は、ヤマハ音楽振興会 YAMAHA 研究活動支援助成、および JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム殻を破るぞ！越境型理工系博士人材育成プロジェクトの支援を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。

最後に、これまで私を温かく見守り、修士課程で出産・子育てという大きなイベントを共に乗り越えながら、どんな時も支えてくれた夫に感謝いたします。また、こどもたちの存在が、母親としてあきらめずに頑張る姿をみせたいと思わせてくれました。挑戦を応援してくれた家族に心よりお礼を申し

上げます.