

演奏熟達者における読譜中の心的表象 ——瞳孔径の変動パターンに着目して——

Mental representation in expert musicians during music reading: An analysis of pupillary response patterns

前田 依泉[†], 正田 悠[‡]

Izumi Maeda, Haruka Shoda

[†] 京都市立芸術大学大学院音楽研究科, [‡] 京都市立芸術大学音楽学部

Kyoto City University of Arts

s26824@st.kcua.ac.jp

概要

本研究では、演奏熟達者の読譜中の心的表象の操作を伴う課題を実施し、そのときの瞳孔径の時系列的変動パターンと個人特性との関連を調べた。関数主成分分析の結果、瞳孔の拡大・縮小のタイミングが異なる6つの変動成分が抽出され、普段・課題実施時の読譜方略との関連があった。また読譜中に無関連の妨害音を聴取する課題では、聴覚的なイメージの鮮明性と読譜前半での瞳孔径の縮小パターンと関連がみられた。聴覚的イメージの鮮明性と読譜方略によって、瞳孔径の変動のタイミングが調整されることが示唆された。

キーワード: 読譜, 心的表象, 瞳孔径, 演奏熟達者, 関数主成分分析

1. 背景と目的

演奏者にとって、視覚的な情報である楽譜を通して楽曲を理解することは、演奏という音響情報を生み出す過程において重要である。演奏熟達者は、読譜の過程で多感覚的な情報を生成しており、音楽を内的に経験する (e.g., Gordon, 2011)。こうした経験や能力については、熟達者間であっても個人差がある (e.g., Brodsky et al., 2003)。これまでの読譜研究では、視手範囲を代表値とする視線行動が主に対象とされてきた (e.g., Perra et al., 2021)。しかし、時々刻々と変動する読譜中の心的過程を客観的に観察、評価するためには、それらの指標のみでは十分とはいえないことから (Kang & Banaji, 2020)、近年では、瞳孔径がそうした内的なプロセスを俊敏に反映する客観的な指標として注目されている。Mathôt (2018, review) では、瞳孔径が物理的な光刺激に対してだけでなく、認知負荷や心的表象によって変化することを示している。したがって、瞳孔径を用いた研究は、読譜中の多感覚的な情報処理の解明においても有効な手法となり得る。

本研究では、演奏熟達者の読譜中の内的な音楽の表象に焦点を当て、心的表象の操作が瞳孔径に及ぼす

影響を調べると同時に、それらと個人特性との関連も調べた。瞳孔径は、時系列変化の平均値や標準偏差といった代表値によっても定量化できる。しかし時々刻々の動的变化を含むデータを一つの代表値として集約することで、時系列データに含まれる情報の大部分は失われてしまう。そこで、本研究では、関数主成分分析 (Ramsay & Silverman, 2005) を用いることで、瞳孔径変動を複数の関数主成分としてまとめ、読譜中の瞳孔径変動のパターンを探り、その動的な変化を捉えると同時に、個人特性との関連を探索的に調べた。

2. 方法

2.1 実験計画

読譜中の心的表象が瞳孔の反応に及ぼす影響を調べるため、3つの読譜条件を設定した。具体的には、普段通りの読譜 (通常条件)、「頭の中で楽譜に記された音楽をできるだけ想像してください」という教示のもと、積極的な心的表象が求められる読譜 (想像条件) および、積極的な心的表象中に、譜面とは無関係なランダムな音高によるピアノの妨害音声が流される読譜 (妨害条件) であった。本研究は京都市立芸術大学の研究倫理審査委員会の承認を得て行われた (承認番号: 2025060502)。実験は、これら3水準からなる読譜条件による一要因参加者内計画で実施した。

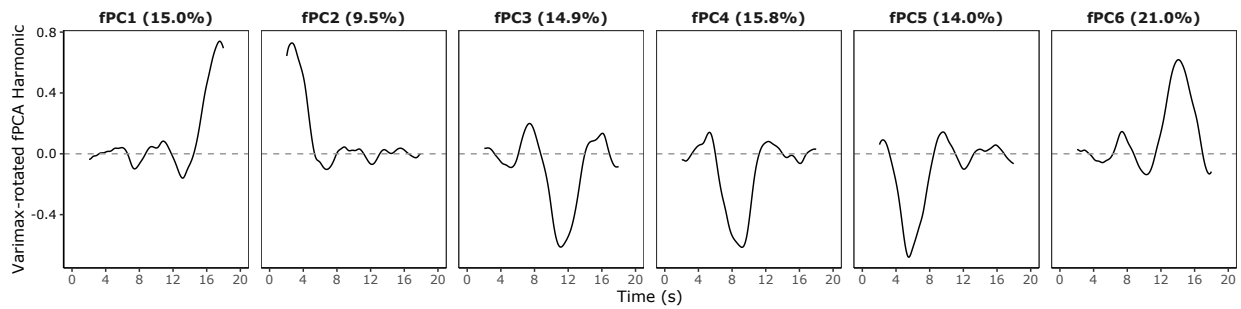
2.2 実験参加者

18–25歳の音楽を専門とする大学生31名 ($M = 21.06$, $SD = 1.82$) が実験に参加した。参加者の専攻は、作曲、弦楽、ピアノ、管打楽、声楽のいずれかで、音楽経験年数は7–21年 ($M = 14.58$, $SD = 4.03$) であった。このうち、データに不備のあった4名を除外し、27名 ($M = 21.19$, $SD = 1.86$) を分析した。

2.3 刺激

読譜課題で用いた譜面は、既存の楽譜集4冊から選定した既知性および規則性が低い任意の小節の単旋律を用いた。高音部譜表のみで構成され、発想記号やテ

図1 関数主成分分析から抽出された6つの主成分（累積説明率 90.1 %）



ンボ記号等の音楽記号や指示は記されなかった。

2.4 質問紙

実験参加者の個人特性を測定するため、福井・青木 (2022) による日本語版プリモス感覚イメージ尺度（以降、日本語版 Psi-Q と呼ぶ）と読譜方略に関する質問紙を用いた。前者は、感覚イメージの鮮明さを評価するために用いた。この尺度は、7つの感覚モダリティ（視覚、聴覚、味覚、嗅覚、触覚、身体感覚、感情）のイメージの鮮明さについて網羅的に測定するものである。本研究では、とりわけ音楽演奏に関連する5つの感覚モダリティ（視覚、聴覚、触覚、身体感覚、感情）に関する25項目を用いた（リッカート尺度11件法）。読譜方略に関する質問は、Zhukov (2014) や Bernardi et al. (2013) を参考に独自に作成した。読譜中における楽譜の聴覚化の程度、身体動作化の程度、旋律を視覚的に捉える程度、音符を言語的に捉える程度について、11段階のリッカート尺度で評価を求めた。

2.5 手続き

実験参加者は、インフォームドコンセントの後、眼鏡型眼球運動測定装置 (Neon, Pupil Labs) を装着した。その後、55インチのディスプレイ (DKS-4K55DG6-LCS14, DMM.com) の前に用意された椅子に座り、あご台上でディスプレイに呈示される4小節の楽譜を、特定の条件下で読んだ。なお、読譜中は声を出したり身体を動かしたりしないよう求められた。

各条件は20試行から構成され、1試行20秒間の読譜時間が設けられた。各条件で呈示された楽譜の調性（短調・長調）は同数であり、楽譜への十分な注意を促すため、読譜の直後には音声を用いた再認課題が課された。読譜条件（3水準）の実施順はカウンターバランスをとった。各条件終了時には、その条件下での読譜方略に関する質問に回答した。また、全条件終了後に日本語版 Psi-Q および音楽経験に関する質問紙に回答した。実験の所要時間は約70分であった。

2.6 瞳孔径データの前処理と分析

得られた瞳孔径データ（200 Hz）には、瞬きなどによる欠損値が含まれるため、Rを用いて前処理を行った。左右いずれかの瞳孔径が2.0～8.0 mmの範囲外を

示した箇所およびその前後20点を欠損値とみなし、欠損区間に対して区分的3次エルミート補間を適用した。その後、データを20 Hzにダウンサンプリングし、Savitzky-Golay フィルタ（3次、窓サイズ41点）による平滑化とノイズの低減を行った。なお分析では、刺激呈示時の画面切り替えによる瞳孔径への影響を除くため、読譜時間20秒のうち、刺激呈示区間の前後各2.0秒を除いた16秒間を解析対象とした。さらに元々の瞳孔径には個人差があるため、注視点呈示中の2.0秒間の瞳孔径を基準とした差分を算出した。本研究では、これを「修正瞳孔径」と呼び、以降の分析に用いた。

3. 結果

3.1 読譜条件が瞳孔径の代表値に及ぼす影響

関数主成分分析を行う前に、代表値として各条件における修正瞳孔径の平均値および標準偏差（ゆらぎ）を算出した。まず、平均値について、通常条件が $M = -0.07$ ($SD = 0.14$)、想像条件が $M = -0.05$ ($SD = 0.09$)、妨害条件が $M = -0.09$ ($SD = 0.16$) であった。次に、標準偏差（ゆらぎ）については、通常条件が $M = 0.12$ ($SD = 0.04$)、想像条件が $M = 0.16$ ($SD = 0.05$)、妨害条件が $M = 0.13$ ($SD = 0.04$) であった。各代表値の平均値をみると、標準偏差（ゆらぎ）の平均値が想像条件で大きいようであった。各代表値が読譜条件によって異なるかどうかを調べるため、読譜条件（3水準、参加者内要因）を独立変数、修正瞳孔径の平均値および標準偏差（ゆらぎ）を従属変数とした一要因分散分析を行った。その結果、平均値では条件の主効果は有意ではなかった ($F(2, 52) = 1.01, p = .37, \eta_p^2 = .04$)。標準偏差（ゆらぎ）では、条件の主効果が有意であった ($F(2, 52) = 13.01, p < .001, \eta_p^2 = .33$)。Bonferroni の補正を用いた多重比較を行った結果、想像条件が他の2条件よりも有意に標準偏差（ゆらぎ）が大きかった（通常と想像： $p = .26$ 、想像と妨害： $p < .001$ 、通常と妨害： $p < .001$ ）。

3.2 瞳孔径データの関数主成分分析の結果

修正瞳孔径の時系列データの動的変化の特徴を抽出するために、関数主成分分析を行った。その際、解釈

表 1 fPC 得点と各条件における読譜方略のスピアマンの相関係数

尺度得点	通常						想像						妨害					
	fPC1	fPC2	fPC3	fPC4	fPC5	fPC6	fPC1	fPC2	fPC3	fPC4	fPC5	fPC6	fPC1	fPC2	fPC3	fPC4	fPC5	fPC6
(a) 課題実施時の方略																		
聴覚化	-.06	-.01	.17	.17	.13	-.05	.04	.08	-.20	-.17	-.11	-.05	-.24	-.19	.23	.23	.36[†]	-.22
身体動作化	.02	.06	-.05	-.07	-.16	.07	.13	-.24	.20	.14	.13	.18	.13	.07	-.10	-.21	-.13	.13
視覚化	.08	.00	-.20	-.15	-.03	.20	.11	-.13	-.10	-.03	-.09	.13	-.11	-.23	.19	.04	.06	-.10
言語化	-.26	-.33[†]	.41*	.39*	.34[†]	-.39*	.19	-.16	-.21	-.11	-.13	.15	-.12	.04	.08	.02	.06	-.14
(b) 普段の読譜方略																		
聴覚化	.00	.03	-.12	-.11	-.16	.09	.04	-.33[†]	.17	.32[†]	.27	.16	.07	-.05	-.04	-.04	.06	.10
身体動作化	.28	.23	-.24	-.22	-.22	.26	.12	-.03	.12	.00	-.13	.01	-.05	.05	.05	-.02	.03	-.07
視覚化	.34[†]	.42*	-.41*	-.41*	-.42*	.42*	-.13	.00	.09	.02	-.02	-.22	.09	.27	-.12	-.23	-.21	.09
言語化	-.12	-.15	.04	.07	.01	-.12	-.01	-.33[†]	.07	.19	.19	.00	-.08	-.20	.11	.12	.20	-.11
(c) 感覚イメージの鮮明さ																		
視覚	.07	.04	-.12	-.09	-.02	.06	-.05	-.19	.22	.27	.08	-.12	-.17	-.08	.23	.14	.18	-.14
聴覚	-.05	-.03	-.04	.01	-.03	-.04	-.05	-.24	.18	.20	.16	-.07	-.31	-.24	.30	.28	.38*	-.34[†]
触覚	.14	.08	-.22	-.22	-.17	.10	-.01	.22	-.06	-.09	-.17	.10	.00	-.08	.04	.02	.11	-.01
身体感覚	.20	.19	-.33[†]	-.31	-.28	.25	-.10	.05	.22	.11	-.04	-.20	.09	.05	-.12	-.11	-.03	.09
感情	.11	.05	-.15	-.12	-.12	.03	-.02	.10	.16	.06	-.11	-.05	-.09	-.05	.07	.06	.13	-.07

* $p < .05$, [†] $p < .10$

の向上を図るため Varimax 回転を適用した。その結果を図 1 に示す（累積説明率 90.1 %）。抽出された 6 つの関数主成分（fPC1～6）は、瞳孔径の散大と収縮のタイミングを反映するような変動パターンを捉えた。以下では、読譜開始後から順に各主成分の特徴を述べる。

まず、楽譜呈示後（2～6 秒）では、fPC2（9.5 %）が正の方向から下降を示した。その後の読譜の前半から中盤にかけては、3 つの主成分（fPC3, fPC4, fPC5）が抽出された。fPC5（14.0 %）は、2～5 秒にかけて下降し、谷を作るとその後、0 付近へと収束した。fPC4（15.8 %）は、読譜前半から中盤（5～9 秒付近）にかけて負の方向に変動し、fPC5 よりも遅い 9 秒付近に谷を形成した。fPC3（14.9 %）も同様の傾向であったが、fPC4 よりもその変動のタイミングが遅く、読譜中盤から終盤（8～11 秒付近）にかけて負の方向へ変動し、谷を示した。fPC6（21.0 %）は fPC3 よりも遅く、10 秒付近から上昇を始めると、15 秒付近に山を形成した。読譜終盤にかけては fPC1（15.0 %）が抽出され、13 秒以降から読譜終了にかけて大きな山を形成した。

3.3 読譜条件が関数主成分得点に及ぼす影響

6 つの主成分について、各参加者の条件ごとの主成分得点を算出した。読譜条件がこれら主成分得点に及ぼす影響を調べるため、読譜条件（3 水準、参加者内要因）を独立変数、各主成分得点を従属変数とする一要因分散分析を行ったが、すべての主成分において条件間での有意な主効果は認められなかった（ $ps > .10$ ）。

3.4 関数主成分得点と個人指標との関連

各主成分得点と各感覚イメージの鮮明さおよび読譜方略（課題実施中・普段の特性）との関連について、スピアマンの順位相関係数 ρ を算出した（表 1）。まず各条件における主成分得点と課題実施時の読譜方略につ

いて（表 1a）、通常条件での主成分得点は、fPC1 を除き、音符を言語的に捉えた程度と相関が認められた。また、妨害条件における fPC5 と、聴覚化をしながら読んだ程度には正の相関傾向があった。想像条件では有意な相関は認められなかった。

普段の読譜方略（表 1b）については、通常条件での各主成分得点と、普段の読譜時に楽譜を視覚的に捉える程度には一貫して関連が認められた。また、想像条件における fPC2 と fPC4 の各主成分得点は、楽譜を聴覚化する程度と負の相関が示された。fPC2 については、楽譜を言語化して捉える程度とも負の相関の傾向を示した。妨害条件での各主成分得点と普段の読譜方略には有意な相関は認められなかった。

感覚イメージの鮮明さ（表 1c）とは、通常条件における fPC3 と身体感覚イメージの鮮明さに負の相関傾向があった。また、妨害条件における fPC5 および fPC6 では聴覚イメージの鮮明さとの相関が認められた。

4. 考察

本研究では、読譜中の瞳孔径の動的变化を関数主成分分析を用いて抽出し、心的表象の操作を伴う読譜や、個人の特性的・状態的な読譜方略が瞳孔径の動的变化といかなる関連にあるかを調べた。その結果、読譜中の瞳孔径の時系列データの約 9 割の分散を説明する 6 つの主成分が抽出された。また、代表値として算出した標準偏差（ゆらぎ）は想像条件で有意に増大したにも関わらず、各主成分得点には読譜条件の主効果は認められなかった。さらに、各主成分得点は、通常読譜時での特性的・状態的な読譜方略や、妨害条件での聴覚イメージの鮮明さとの関連を示した。

瞳孔径は、認知負荷や心的努力を反映する生理指標として知られ、これらの高まりは瞳孔径の拡張を促すとされる (Mathôt, 2018)。本研究において、読譜条件間での修正瞳孔径の平均値に差が認められなかったにもかかわらず、標準偏差（ゆらぎ）が想像条件で大きかった。これは、想像条件での読譜では、瞳孔径の微細な拡大・縮小という動的な変化が生じていたことを示しており、楽譜情報の取り込みにくえ、それらを内的に表象して処理する過程での頻繁な注意の切り替えによって生じたゆらぎであると解釈できる。

また、関数主成分分析により抽出された6つの主成分 (fPC1～fPC6) は、読譜中の時間推移を反映する瞳孔径の変動パターンを示した。楽譜呈示2秒後から下降を示した fPC2 は、読譜の初期段階の瞳孔反応の一部であるとみなすことができる。ここでは、拍子や調のような、基本的な音楽的構造を把握するための視覚的処理が反映されていると考えられる。その後から終盤にかけては、特定の条件下での課題遂行に注力していたと推測され、この中には、音高やリズムといった楽譜情報の取り込みから心的表象を形成するまでのプロセスも内包される。したがって、本研究で抽出された主成分には、楽譜の情報に由来する変動のほかに、個人の読譜方略や感覚イメージ特性に由来する変動が含まれていると考えられる。実際、主成分得点との相関係数により、読譜中の動的な瞳孔径の変化は、参加者の読譜方略と結びついていたことが示されている。通常条件における主成分得点は、特性的な読譜方略と状態的な読譜方略と関連しており、関数主成分分析によって得られた6つの主成分が、とりわけ言語化と視覚化という読譜方略を反映していることを示している。通常条件は参加者に自由な読譜を求めた条件であるが、普段から楽譜を図形的に捉える視覚化方略を用いるほど、瞳孔が拡大した。一方で、通常条件における課題実践時の読譜方略は、楽譜を音名で捉える言語化の程度と関連があり、楽譜の音を言語的に捉えていたほど、瞳孔径は拡張せず、むしろ縮小を示した。これらの結果は、演奏熟達者の中でも、視覚化方略と言語化方略を使う程度にはグラデーションがあり、こうした読譜方略の個人差により、瞳孔径の変動パターンが異なることを示唆する。

さらに妨害条件の fPC5 と fPC6 は、聴覚的なイメージの鮮明さと関連を示した。これは、聴覚イメージが鮮明であるほど、読譜前半で瞳孔径が縮小し、中盤から後半にかけては拡大しないことを意味する。Maeda & Shoda (2025, October 30) は、心的操作を伴う読譜が瞳孔径のゆらぎを増大させる一方で、それが妨害され

た条件では聴覚イメージが鮮明なほどゆらぎが小さいと報告している。本研究の結果では、聴覚的な鮮明性と読譜方略が瞳孔径の変動のタイミングを調整したと解釈できる。また fPC5 は、妨害条件での課題実施中における聴覚化とも正の相関があり、聴覚化しながら読むほど瞳孔径は縮小する傾向があった。これらの結果は、意識的な心的表象が課題とは無関係な音声で妨害される読譜において、心内での楽譜の聴覚化が、特に読譜前半の瞳孔径の縮小にあらわれることを示している。

本研究では、心的表象の操作を伴う読譜中における瞳孔径の動的変化を調べた。しかし、用いた楽譜は4小節と短く、直後に音声再認課題が実施されたことから、読譜中の楽譜の読み返しやそれに伴う認知的な処理が瞳孔反応に影響を及ぼした可能性もあり得る。また、参加者間や試行ごとでの読み返しや、読譜に要した時間については考慮しきれていない。今後の研究により、1回目の読譜範囲を抽出して時間を正規化することや教示による読み返しの制約を課すことで、読譜中の認知過程についてさらなる解明が期待される。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（23K28205）の助成を受けた。

引用文献

- Bernardi, N. F., Schories, A., Jabusch, H.-C., Colombo, B., & Altenmüller, E. (2013). Mental practice in music memorization: An ecological-empirical study. *Music Perception*, 30(3), 275–290.
- Brodsky, W., Henik, A., Rubinstein, B. S., & Zorman, M. (2003). Auditory imagery from musical notation in expert musicians. *Perception & Psychophysics*, 65(4), 602–612.
- 福井 晴那・青木 左奈枝 (2022). 日本語版プリモス感覚イメージ尺度 (日本語版 Psi-Q) の作成 パーソナリティ研究, 31, 87–99.
- Gordon, E. E. (2011). *Roots of music learning theory and audition*. GIA Publications.
- Kang, O., & Banaji, M. R. (2020). Pupillometric decoding of high-level musical imagery. *Consciousness and Cognition*, 77(102862).
- Maeda, I., & Shoda, H. (2025, October 30). *The pupil dilation responses of expert musicians during musical notation reading* [Poster presentation]. ISPS 2025, Shanghai Conservatory of Music, Shanghai, China.
- Mathôt, S. (2018). Pupillometry: Psychology, physiology, and function. *Journal of Cognition*, 1(1:16), 1–23.
- Perra, J., Poulin-Charronnat, B., Baccino, T., & Draï-Zerbib, V. (2021). Review on eye-hand span in sight-reading of music. *Journal of Eye Movement Research*, 14(4:4), 1–25.
- Ramsay, J. O., & Silverman, B. W. (2005). *Functional data analysis*. Springer..
- Zhukov, K. (2014). Exploring advanced piano students' approaches to sight-reading. *International Journal of Music Education*, 32(4), 487–498.