

空間的処理はハーモニー認知に影響するか：ERPによる研究

橋本 翠・宮谷真人

Does the spatial processing influence to harmonic cognition? : An event-related potential study

Midori Hashimoto and Makoto Miyatani

Recent studies have reported that early right anterior negativity (ERAN) is elicited by harmonic irregularity in Western tonal music. We assumed that tonal hierarchy—as the basic structure for harmony processing—is expressed as a mental representation with spatial specificity. In this study, we examined whether this assumption was appropriate by investigating the effect of a mental rotation task on ERAN. If the representation of tonal hierarchy has a spatial structure, mental rotation of the structure will decrease the amplitude of ERAN. Twelve adult participants took part in the experiment, which comprised three task conditions (mental rotation, reading, and control). Event-related potentials to cadenzas including the Neapolitan sixth chord as the deviated tone were recorded under each condition. Results showed a decrease of ERAN amplitude in the mental rotation task, suggesting a relationship between spatial processing and the establishment of tonal hierarchy. Further research is necessary to confirm distinguish whether the effect is attentional or task specific.

キーワード : harmony, ERP, ERAN, spatial processing, tonal hierarchy

問 題

ハーモニーの認知処理に焦点をあてた心理生理学的研究は、ハーモニー処理に特有の ERP (event-related potentials) 成分である ERAN (early right anterior negativity) の存在と性質を明らかにしてきた (e.g., Koelsh, Gunter, Friederici, & Schröger, 2000)。これまでの研究から、ハーモニー処理は調性階層性 (tonal hierarchy) に基づいておこなわれ、そこからの逸脱を反映して ERAN が惹起することが明らかとなった。しかし、ERAN 成分のラテラルリティ、どのようなハーモニー処理機能に由来するのか、自動性などについて、必ずしも一貫した知見が得られていない。

こうした一貫性を欠く研究結果を統一的に理解するための工夫として、ハーモニー認知を支える処理過程の性質に焦点を当てることが有用であると考えられる。まず、ERAN 惹起の背景として、ハーモニー処理の基礎となる調性階層性の存在が不可欠であると仮定する。調性階層性とは、調性的文脈をもつ音楽を聴いたとき、心内で、その調のもととなる主音が最も安定する重要な音の高さとして認知されることであり、その安定性が、主音を始めとし、次に主音以外の主和音構成音、そ

の他の全音階音，非全音階音という順で階層的になっている性質のことである (Krumhansl, 1979, 1990; Krumhansl & Shepard, 1979)。この調性階層性は，調性に関する心理学的表現として多く用いられ，ハーモニーを考察するうえで有用である。Krumhansl & Shepard (1979) は，プローブ音法を用いて調性階層性を調べる心理学的な実験を行った。ある音楽的文脈 (例えば，和音配列など) とプローブ音 (半音階上の 12 のピッチの音からランダムに抽出) を呈示し，参加者はプローブ音が音楽的文脈にどの程度適合しているかを 7 段階で評定した。その結果，より安定性のあるプローブ音ほど評定が高いことが示された。また，Krumhansl & Kessler (1982) は，12 の要素 (例えば，ハ長調の 3 つのカデンツ F-G-C など) に続けてプローブ音を呈示し，プローブ音が要素とどの程度音楽的に合っているかについて 7 段階で評定を行った。その結果，調性の関係はトースであるということを示した (Krumhansl, Bharucha, & Kessler, 1982)。つまり，ある 2 つの調性間の相関が高ければ高いほど，空間的表現において両者は近接することになる。これらの結果は，調性階層性の確立が音楽的文脈を認知するうえでも重要な役割を担っており，その処理過程には空間的要素が含まれることを示唆している。

調性階層性と空間的要素の関連性を支持する知見に Bharucha (1987) のニューラルネットワークモデルがある。Bharucha (1987) は，図式的期待が知覚のメカニズムからどのように生じるのかということニューラルネットワークモデルとして示している。Bharucha (1984) は，音楽的文脈形成に大きな役割を担っている音楽的期待 (musical expectation) を図式的期待 (schematic expectation) と事実に期待 (veridical expectation) の 2 つに分けている。前者を特定の文化に特化せず，自然発生的でより一般的な図式，すなわちスキーマによってもたらされるものとし，後者を実際の音楽のある部分や特定の記憶，例えば，馴染みのある曲においては，実際に後に続くフレーズについての期待を生み出すようなものとしている。この 2 つの期待のうち，図式的期待には，ある曲の流れの安定性を決定するような情報が埋め込まれており，これが調性階層性であるとしている。つまり，調性を持っているある曲を聴いたとき，ある調の下で音や和音の相対的な安定性を反映するものと解釈できる。Bharucha (1987) が示したニューラルネットワークモデルは，音の高さを表すユニットが和音を表すユニットと結合をもっており，和音を表すユニットがさらに調性を表すユニットと結合をもつというモデルである。こうしたモデルでも示されているように，調性階層性と空間的処理は何かの関係性をもつ可能性が考えられる。

橋本・宮谷 (2013) は，空間的処理が必要な 3 次元図形の心的回転課題 (3D 課題) と，その必要な程度が小さい 2 次元図形の視覚探索課題 (2D 課題) を遂行中の実験参加者から ERAN を記録した。一次課題と二次課題の 2 つの課題を同時に実験参加者に課し，一次課題だけの場合と比べてどの程度成績が低下するかを調べることにより，一次課題に関与しているワーキングメモリの下位システムを特定する二重課題法 (三宅・齊藤, 2001) の考え方にに基づき，ERAN 惹起の背景にある調性階層性が空間的性質をもつ心的表象として表現されているならば，2D 課題遂行条件では ERAN は大きな影響を受けないが，3D 課題の遂行により，ERAN が出現しなくなるか，振幅が低下すると予測した。その結果，5 つの和音配列のうちの第 5 位置の逸脱和音 (ナポリの六) に対する ERP において，3D 条件の ERAN は，CON 条件や 2D 条件に比べて小さかった。このことは，3D 課題の遂行に

より調性の確立が妨害された結果であると解釈できた。つまり、調性の確立と空間的処理との間に何らかの関係がある可能性が示された。ただし、この条件差に関しては、統計的に有意な結果ではなかったため、妨害課題の種類を変更することや、高振幅の ERAN が出現する刺激を工夫するなどして、統計的に信頼できる結果が得られるかどうかを再度検討する必要があると考えられた。また、異なる音色の和音の検出課題の成績が、2D 課題条件に比べて 3D 課題条件で低かったことから、2D 課題と比較して 3D 課題の難易度が高かったと考えられる。ERAN の惹起には注意が必要であるという結果が得られている (橋本, 2011) ことから、課題の難易度の影響は排除できず、橋本・宮谷 (2013) で示された 2D 課題条件と 3D 課題条件の ERAN の違いは、妨害課題の難易度に起因する可能性がある。

これらのことを踏まえ、本研究では、橋本・宮谷 (2013) と同様に、調性階層性が空間的性質をもつ心的表象として表現されていると仮定し、空間的処理を妨害すると想定される課題を遂行することが ERAN に及ぼす影響について検討する。本研究では、空間的要素をもつ課題とそうではない課題との区別を明確にするために、2D 課題のかわりに黙読課題 (以下, RD 課題) 条件を設定した。また、3D 課題として、橋本・宮谷 (2013) よりも難易度が低くなるような課題を用いた。ERAN 惹起の背景にある調性階層性が空間的性質をもつならば、RD 課題条件では ERAN は大きな影響を受けないが、3D 課題の遂行により、ERAN が出現しなくなるか、振幅が低下すると予測した。

方 法

実験参加者 成人 12 名 (女性 3 名, 年齢: $M \pm SD = 22.7 \pm 2.1$) が実験に参加した。いずれの参加者も、課題遂行に支障のない視聴覚機能を有していた。実験開始前に参加者全員に実験について紙面および口頭で説明し、実験参加の了解を得た。

実験計画 課題条件 (3) × 逸脱音の位置 (2) × 刺激音 (2) の 3 要因反復測定計画を用いた。

刺激 音刺激条件として逸脱のない条件 (以下, In-key とする) と逸脱 (ナポリの六) 条件 (以下, Neapoli とする) の 2 つを設けた (Figure 1)。2 条件のすべての実験刺激は、4 つの声部によって構成された 5 つの和音による和音進行で、1—4 番目の和音の呈示時間は 600 ms、5 番目の和音呈示時間は 1200 ms であった。32 種類の異なる和音進行を無作為順に配した計 160 個の和音を 1 試行とし、1 ブロックは 7 試行からなっていた。和音と和音、または和音進行と和音進行との間に無音部はなく、1 つの和音、あるいは和音進行の呈示後、連続して次の刺激を呈示した。全和音進行のうち、50%がある音階内のみの音からなる和音進行に基づいた逸脱のない条件 (In-key)、25%が和音進行の 3 番目にナポリの六を配置した和音進行 (Neapoli/3rd)、25%が和音進行の 5 番目にナポリの六を配置した和音進行 (Neapoli/5th) であった。なお、すべての和音進行はトニックで始まり、2 番目にトニック、サブメディアント、サブドミナント、メディアントのいずれかを、3 番目にサブドミナント、ナポリの六のいずれかを、4 番目にドミナント 7th、5 番目にトニック、ナポリの六のいずれかを配した。全音楽刺激の 20%で、ピアノ以外の弦楽器音を用いた。

音刺激は、音楽作成ソフト “finale 2010” の MIDI によってピアノ音、もしくは弦楽器音を用いて作成した。音刺激は、眼前から 60 cm 離れて置かれたスピーカーによって、60 dB の大きさで呈示

脱音 (ナポリの六) の存在や性質については伝えなかった。1 ブロックごとに適度な休憩を挟み、各試行は参加者のペースで開始した。

脳波の記録および分析 脳波は、Ag/AgCl 電極を用い、国際式 10%法に基づく 7 部位 (F3, F4, C3, C4, Fz, Cz, Pz) から鼻尖を基準に導出した。脳波および眼電図は、高帯域遮断 30 Hz、低帯域遮断 0.08 Hz のデジタルフィルターを用いて、日本光電社製デジタル脳波計 (Neurofax EEG-1100) により、サンプリング周波数 200 Hz で記録した。電極インピーダンスは 5k Ω 以下とした。

ERP の ERAN 成分を分析した。まず、各課題条件で、逸脱音の位置と刺激音を組み合わせた条件 (In-key/3rd, In-key/5th, Neapoli/3rd, Neapoli/5th) 別に、瞬き等の顕著なアーチファクト ($\pm 80 \mu\text{V}$ 以上) のない試行について刺激呈示前 100 ms から呈示後 400 ms の区間を加算平均して ERP を算出した。F3 および F4 で記録された ERP の刺激呈示後 225—265 ms 区間の平均電位を ERAN 振幅とした。統計分析には反復測定分散分析を用い、多重比較には Tukey の HSD 法を用いた。有意水準は .05 に設定した。

結 果

行動指標 RD 課題の正答率 ($\pm SD$) は、89.5% (± 7.4)、3D 課題の正答率は、58.3% (± 26.2) であった。対応のある t 検定を行ったところ、課題間の正答率の差は有意であった ($t(11)=3.89, p<.01$)。

生理指標 F3 および F4 で記録された第 5 位置の和音に対する総平均 ERP 波形を課題条件別に Figure 3 に示す。また、Neapoli 刺激に対する ERP から In-key 刺激に対する ERP を引き算した波形を Figure 4 に示す。視察によると、刺激呈示後約 130 ms を頂点とする陰性の頂点を形成した後、約 150 ms 付近から陽性方向に条件間で異なった分岐を示し、CON 条件でのみ、Neapoli 刺激に対する ERP に約 250 ms を頂点とする小さな陰性の成分が観察された。この陰性成分が ERAN と考えられる。この成分について詳細に検討するために、刺激呈示後 225—265 ms の区間平均電位を算出し、課題 3 (CON, RD, 3D) \times 刺激音 2 (In-key, Neapoli) \times 導出部位 2 (F3, F4) の 3 要因分散分析を実施した。その結果、課題の主効果 ($F(2, 22)=3.76, p<.05$)、および課題 \times 刺激音の交互作用 ($F(2, 22)=3.58, p<.05$)、刺激音 \times 導出部位の交互作用 ($F(1, 11)=10.84, p<.01$) が有意であった。課題の効果に関する多重比較の結果、3D 条件 (1.9 μV) よりも CON 条件 (0.7 μV) でより陰性であった。それぞれの交互作用について単純主効果の検定を行ったところ、Neapoli 刺激に対する ERP は、3D 条件 (2.6 μV) よりも CON 条件 (0.4 μV) でより陰性であった。また、In-key 刺激に対する ERP は、F3 と F4 の間に振幅差がなかった (F3: 0.8 μV , F4: 0.8 μV) のに対して、Neapoli 刺激 ERP は、F4 (1.8 μV) よりも F3 (1.4 μV) でより陰性であった。

考 察

本研究では、調性階層性が脳内において空間的性質をもつ心的表象として表現されていると仮定し、心的回転課題の遂行が ERAN に及ぼす影響について調べることにより、この仮定が妥当であるかどうかについて検討することを目的とした。心的回転課題の遂行が ERAN 出現を妨げ、非空間的課題である黙読課題の影響が心的回転課題に比べて小さいことを示すことができれば、調性階層性

の脳内における表象に、空間的信息が含まれていると推測できると考えた。

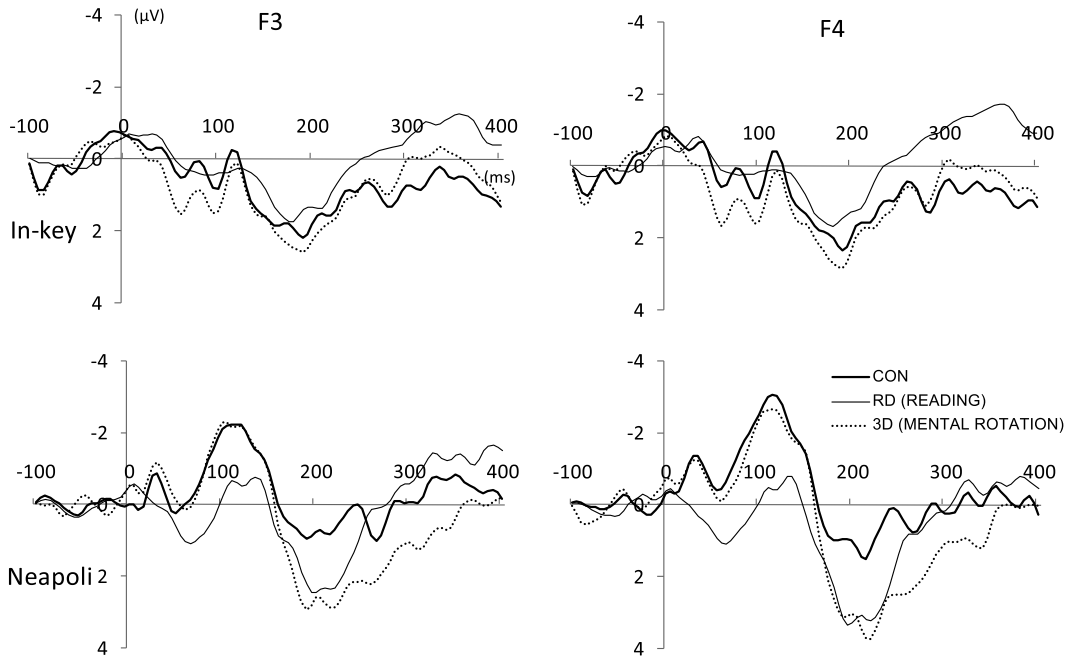


Figure 3. F3 および F4 における第 5 位置の In-key 刺激, Neapoli 刺激に対する総平均 ERP 波形の重ね書き ($N=12$, 上: In-key, 下: Neapoli, 左: F3 導出, 右: F4 導出, 太実線: CON 条件, 細実線: RD 条件, 点線: 3D 条件)

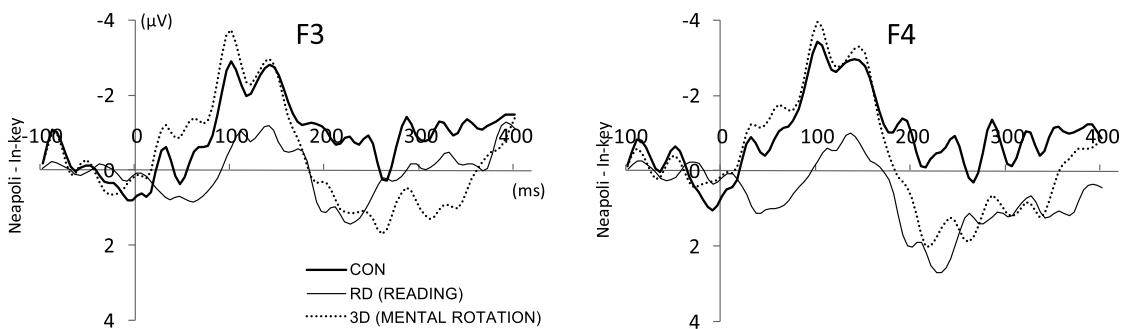


Figure 4. F3 および F4 における第 5 位置の Neapoli 刺激に対する ERP から In-key 刺激に対する ERP を引き算した差分波形 (左: F3 導出, 右: F4 導出, 太実線: CON 条件, 細実線: RD 条件, 点線: 3D 条件)

Figure 4 の引き算波形の視察では、ERAN 潜時帯における陰性成分は CON 条件でのみ出現しており、RD および 3D 条件では観察できない。これは、RD 課題あるいは 3D 課題によって調性階層性の確立が妨げられた結果、そこからの逸脱が ERP に反映されなかったと解釈できる。特に 3D 条件と CON 条件との間に統計的な有意差が得られたことから、橋本・宮谷 (2013) の結果と合わせて考えると、調性の確立と空間的処理との間に何らかの関係があることが示されたといえる。本研究では、橋本・宮谷 (2013) で用いた課題から視覚探索部分を取り除くことによって難易度を低くした 3D 課題を用いた。しかし結果的には、本研究における 3D 課題の正答率は、橋本・宮谷 (2013) よりも低くなっていた。正答率の低下そのものは、回答時には元の刺激図形が呈示されておらず、参加者は保持されたイメージのみに基づいて判断しなければならなかったことで説明できる。本研究において 3D 条件と CON 条件の違いが統計的に信頼できる結果として示されたことは、課題の探索的側面よりも心的に回転した 3 次元刺激を保持しておくことが、調性の確立に必要な空間的資源をより多く消費した結果であると考えられる。

しかし、Figure 4 では、RD 条件と 3D 条件の ERAN 潜時帯の波形に大きな違いはなく、課題×刺激音の交互作用の分析でも、RD 条件と 3D 条件に有意な振幅差はなかった。したがって、3D 条件と CON 条件の有意な振幅差が、3D 課題の空間的性質によってのみもたらされたものであるとは結論できない。今後も、注意のように空間的要素をもつかどうかに関わらず生じる影響と、課題の空間的性質そのものが及ぼす影響を区別して評価する工夫が必要である。また、本研究では空間的性質をもつ課題の妨害効果について検討したが、モーツアルトの音楽を聴取することによりスタンフォードビネー知能検査の空間推理課題や紙切り問題の成績が向上することを報告した Rausher, Shaw, & Ky (1993, 1995) のような研究もあることから、調性階層性が確立されることにより、空間的処理に関連する心的過程を反映する ERP 成分、例えば視覚性 N1 や N2pc がどのように変化するかという観点からの検討も可能であろう。

本研究では、ERAN の左右差に関して従来とは異なる結果が得られた。これまでの研究 (e.g., Koelsh et al., 2000) では、ERAN は右側優位であることが報告されており、橋本・宮谷 (2013) においても ERAN は F3 よりも F4 で大きいことが示された。複数の言語的、空間的課題による左右半球のアルファ波ピーク周波数の変化の検討を行った苧坂 (1994) によると、心像課題では前頭右半球のピーク周波数の増加が目立った。また、心的回転課題では、心像課題と比較すると左右半球ともピーク周波数の変位が大きいものの、計算課題とは逆に、前頭、後頭とも右半球の変位が左半球より大きいことが示された。特に前頭右半球ではその傾向が著しく、これらの結果は、大脳右半球で空間的情報処理が行われていると考える従来の研究報告 (e.g., Rebert & Low, 1978; Galin & Ornstein, 1972) をある程度支持するものであると考えられる。しかし、本研究においては、Neapoli 刺激に対する ERAN は F4 よりも F3 でより陰性、つまり左側が優位であるという結果となり、先行研究 (e.g., Koelsh et al., 2000) や、空間処理は右半球優位であるという報告 (e.g., Rebert & Low, 1978; Galin & Ornstein, 1972; 苧坂, 1994) と一致しないものとなった。この結果を説明するための一つの根拠として、Breitling, Guenther, & Rondot (1987) の結果を挙げることができる。Breitling et al. (1987) は、学校教育以外の専門的な音楽訓練を受けていない右利きの正常な成人に 3 種類の音刺激を聴取させ、

それぞれの刺激を聴いている時の脳波を測定した。1つ目の刺激は、440 Hzの単音をスタッカートで繰り返し聴かせる単音条件、2つ目は、ピアノのハ長調の音階をスタッカートで弾いた音階条件、3つ目は、ショパンの“華麗なる大円舞曲”のピアノ演奏を聴かせるメロディ条件であった。その結果、単音条件と音階条件では左側頭部がより強く活性化されるのに対し、メロディ条件では、右側の側頭部と前頭部がより強く活性化した。つまり、メロディを聴くといった調性を確立しなければならない課題の場合、右側の側頭部および前頭部がより賦活するということが考えられ、これは先行研究の結果 (e.g., Koelsh et al., 2000) とも一致している。しかし、本研究では、空間課題を同時に遂行したことにより、調性の確立が妨げられ、左側が優位になった可能性が考えられる。橋本・宮谷 (2013) と本研究で左右差に関して反対の結果が得られたことについては、本研究における3D課題が、調性の確立に対してより強い妨害効果をもたらした結果である可能性がある。ERANの発生に関与する脳領域や出現機序に関しては、未だ統一した知見は得られていない。調性階層性の確立と空間処理との関連性についてさらに検討することで、ERANの性質を明確にするための新たな知見を提供することができると考えられる。

引用文献

- Bharucha, J. J. (1984). Anchoring effects in music: The resolution of dissonance. *Cognitive Psychology*, **16**, 485-518.
- Bharucha, J. J. (1987). Music cognition and perceptual facilitation: A connectionist framework. *Music Perception*, **5**, 1-30.
- Breitling, D., Guenther, W., & Rondot, P. (1987). Auditory perception of music measured by brain electrical activity mapping. *Neuropsychologia*, **25**, 765-774.
- Galin, D., & Ornstein, R. (1972). Lateral specialization of cognitive mode: An EEG study. *Psychophysiology*, **9**, 412-418.
- 橋本 翠 (2011). 音楽的文脈の認知に関連した ERAN に対する注意の効果 広島大学大学院教育学研究科紀要 第三部 (教育人間科学領域), **60**, 225-232.
- 橋本 翠・宮谷真人 (2013). ハーモニー認知と空間的処理の関連 : ERAN を指標として 広島大学心理学研究, **13**, 11-24.
- Koelsch, S., Gunter, T., Friederici, A. D., & Schröger, E. (2000). Brain indices of music processing: “Nonmusicians” are musical. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **12**, 520-541.
- Krumhansl, C. L. (1979). The psychological representation of musical pitch in a tonal context. *Cognitive Psychology*, **11**, 346-374.
- Krumhansl, C. L. (1990). *Cognitive foundations of musical pitch*. Oxford: Oxford University Press.
- Krumhansl, C. L., Bharucha, J. J., & Kessler, E. J. (1982). Perceived harmonic structure of chords in three related musical keys. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **8**, 24-36.
- Krumhansl, C. L., & Kessler, E. J. (1982). Tracing the dynamic changes in perceived tonal organization in

- spatial representation of musical keys. *Psychological Review*, **89**, 334-368.
- Krumhansl, C. L., & Shepard, R. N. (1979). Quantification of the hierarchy of tonal functions within a diatonic context. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **5**, 579-594.
- 三宅 晶・齊藤 智 (2001). 作動記憶研究の現状と展開 心理学研究, **72**, 336-350.
- 荻坂満里子 (1994). ワーキングメモリの認知神経心理学的研究—脳波からのアプローチ— 風間書房
- Rebert, C. S., & Low, D. W. (1978). Differential hemispheric activation during complex visuomotor performance. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, **44**, 724-734.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, K. N. (1993). Music and spatial task performance. *Nature*, **365**, 611.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, K. N. (1995). Listening to Mozart enhances spatial-temporal reasoning: Towards a neurophysiological basis. *Neuroscience Letters*, **185**, 44-47.
- Shepard, S., & Metzler, D. (1988). Mental rotation: Effects of dimensionality of objects and type of task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**, 3-11.