

鍵盤楽器演奏における曲中フレーズ学習過程の ACT-R シミュレーション： 学習促進要因の抽出

ACT-R Simulation of the Music Motif Learning Process in Keyboard Instrument Performance:
Extraction of Learning Facilitating Factors

野上 真[†]
Shin Nogami

後閑 祐介[†]
Yusuke Gokan

北島 宗雄[†]
Muneo Kitajima

中平 勝子[†]
Katsuko T. Nakahira

1 はじめに

鍵盤楽器の演奏の初期学習では楽譜の音高・音価を正確に学習し、打鍵する必要がある。その認知的/心理的理解については、次の様な言及がある。

山下 [2] は、レッスンに対する科学的アプローチの動向をまとめ、以下の 2 点を特に指摘している。

- (1) 器楽指導では熟達や練習など技能習得が課題になっており、指導過程と学習過程の関わりや心理学や生理学的な問題への対応等もあること、
- (2) 練習では多くの練習時間を要し、その間に運動プログラムが発達して、他の認知技能の発達と連動しながら、学習過程と演奏過程の全体が自動化すると考えらるること。

水戸 [4] は、器楽演奏一般に必要な読譜について、音の高さと長さの情報を正確に読み取るだけでなく、演奏するために一定の速度にしたがって楽譜情報を読み取っていくことと指摘している。また、熟達者は初心者に比べて一度に処理できる情報量が多い。さらに一つ一つの音を明確に判断するだけでなくいくつかの音の関係を音楽的知識を活用しパターンとして認識することについても言及している。

以上のことを踏まえると、鍵盤楽器演奏の初期学習に対する読譜と認知および学習過程の理解は、鍵盤楽器演奏の初期学習支援につながると考えられる。そこで、本稿は鍵盤楽器演奏の初期学習支援に対する基礎検討として、曲中のフレーズに対する演奏習熟促進要素の候補抽出を行う。鍵盤楽器演奏の初期学習には、楽譜にかかれる音価・音高を正確に再現することが要求される。その過程は、楽譜の知覚、音符(音価)判定、打鍵運動の 3 要素から構成されるが、本稿では先行研究に倣い知覚—認知の部分に着目し、認知アーキテクチャである ACT-R 理論を用いてシミュレーションする。練習する楽曲数・含有音符種別数・練習スケジュールを変数として、楽曲に含まれるフレーズの習熟度がどの変数に大きく関与するかを先行研究 [3] におけるエラー発生過程をもとに考察する。

2 シミュレーション実験の設計

2.1 シミュレーションの基本方針

今回行う実験は、音価判定およびフレーズ判定を ACT-R をベースにした認知シミュレーションで行う。音価、およびフレーズの検索は、その実行をシミュレートするプロダクションルールの記述が可能である。プロダクションルールを用いて、次の様に音価検索確率、フレーズ検索確率を求める。

- 単音単位での音価判定は ACT-R における活性化方程式から算出されるチャンク(単音の音価)の検索確率を求める。
- フレーズの検索については、部分照合が必要となるため、照合方程式から算出される検索確率を求める。

以下に、概要を説明する。

2.2 単音単位での実験

単音単位での音価判定については後閑ら [3] によって作成されたシミュレーションを利用する。音符を構成する 4 要素である、符頭(head)、符幹(stem)、符尾(flag)、符点(dot)について、視覚的に音符情報を獲得した際に構成要素を格納するスロット j を設定する。これらの情報を符号化し入力情報として、音価判定シミュレーションを行う。音符と対応する音価が出力される。各音符の検索確率 P_i は i 番目のチャンクの活性化値を A_i とするとき、以下の式で求められる(例えば [1])。

$$A_i = B_i + \sum_j W_j S_{ji} \quad (1)$$

$$B_i = \ln \left(\sum_k t_k^{-0.5} \right) \quad (2)$$

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(A_i - \tau)/s}}, \quad \tau \text{ は閾値, } \sigma \text{ はノイズ} \quad (3)$$

$$s = \sqrt{3}\sigma/\pi \quad (4)$$

基礎活性 B_i は、チャンクの過去の使用履歴を反映し、 t_k は過去にチャンク i が利用された時刻と現在の時刻の差、または、その間に実行されたプロダクションルールの数である。原子活性 W_j は知覚した音符要素 j に対して与えられる注意の大きさである。連合強度 R_{ji} はスロットに音符要素 j が現れるときにチャンク i が必要とされる確率がどれくらい増加するかを表

[†] 長岡技術科学大学

す。 $S_{ji} = \ln(R_{ji})$ で定義し、 R_{ji} は以下の式で求められる。

$$R_{ji} = \frac{\alpha \times R_{ji}^* + F(C_j) \times \frac{P_e(N_i|C_j)}{P_e(N_i)}}{\alpha + F(C_j)} \quad (5)$$

このシミュレーションの際には 1 小節あたり四分音符が四つ並ぶものを 4 小節、最後に全音符一つの楽曲 1、1 小節あたりに二分音符が二つを 4 小節、最後に全音符一つの楽曲 2、1 小節あたりに付点二分音符一つと四分音符が一つを四小節と最後に全音符一つとなる楽曲 3 の 3 種類を設定する。

2.3 フレーズ単位での実験

後閑らの先行研究 [3] では単音の音符に対する検索確率を求めてチャンク検索を行っているが、本稿では複数の音符のまとまりをフレーズとし、このフレーズ単位で学習した際の音価のそれぞれの検索確率を求め、チャンク検索を行う。

その際、単純化するため、フレーズに含まれる各音符の音価判定については、前項で示した実験の結果を踏まえた振る舞いをする事とした。また、チャンク検索を行うためのプロダクションルールの記述は必要である。

チャンク検索確率の計算に用いる照合方程式は、マッチスコアを M_{ip} 、ミスマッチの程度 (mismatch penalty constant) を D_{ip} 、チャンクの活性値を A_i とすると、次の式で求められる (例えば [1])。

$$\begin{aligned} M_{ip} &= A_i - D_{ip} \\ &= B + \sum_j W_j S_{ji} - D_{ip} \end{aligned}$$

M_{ip} を用いて、チャンク i の検索確率は

$$\frac{e^{M_{ip}/t}}{\sum_j e^{M_{ip}/t}}, \quad \text{ただし } t = \frac{\sqrt{6}\sigma}{\pi} = \sqrt{2}s$$

で求められる。

本稿では練習する楽曲を 2 種類、スケジュールを 3 種類設定する。楽曲 A は 1 小節に 3 から 5 音のパターンがあり、八分音符、四分音符、付点二分音符の 3 種類の音符が曲中に出てくる 4 分の 3 拍子の楽曲、楽曲 B は 1 小節あたりに 1 から 6 音含まれるパターンがあり、付点四分音符、八分音符、付点二分音符の 3 種類が含まれる 8 分の 6 拍子の楽曲である。楽曲に登場する基本フレーズパターンを図 1 に示す。基本的には各楽曲とも 4 つの基本フレーズで構成される楽曲である。

練習スケジュールは先行研究との比較ができるように先行研究に倣い、すべての曲を一度ずつ練習するのを繰り返すスケジュール A、同じ曲を一定回数練習するスケジュール B、すべての楽曲を 1 度ずつ練習し、休憩を入れ、再び練習をするというスケジュール C の 3 種類を設定する。

曲中に八分音符が連続しているが楽譜内で旗同士がつながっている場合、独立した音符が並んでいると仮定する。本稿ではフレーズ単位での正答率の違いを確認するためにまず楽曲 A、B に対して単音の場合の判定を行う。

	楽曲1	楽曲2
フレーズ構成1		
フレーズ構成2		
フレーズ構成3		
フレーズ構成4		

図 1 今回使用する楽曲に含まれる基本フレーズ。

3 結果

本稿執筆時点では、フレーズ判定については計算途中であるため、単音単位での音価判定結果について述べる。

3.1 単音の音価判定に対するシミュレーション結果

楽曲 1 ~ 3 について後閑らによって作成されたシミュレーションの結果を以下に示す。グラフの横軸には対数を用いている。また、単音の音価判定では、 S_{ji} は音符要素の出現頻度のみの影響を受けるため、練習中の音符の出現順序に依らない。また、出現頻度の低い音符要素ほど大きな値を取る。この様な特徴があるため、本稿では基礎活性に対するシミュレーション結果を述べる。

スケジュール A の特徴

スケジュール A の B_i の変動を図 2 に示す。スケジュール A は楽曲に出現する音符は全て偏りなく出現するため、 B_i のグラフでは出現する音符の値がすべて増加する。

スケジュール B の特徴

スケジュール B の B_i の変動を図 4 に示す。スケジュール B では練習の途中で曲が切り替わり、登場しなくなる音符種と登場するようになる音符種があり、登場しなくなる音符種の B_i は減少し、登場するようになると B_i は増加する。全音符は楽曲の変化に伴い登場頻度が変化するため傾向も変化している。

スケジュール C の特徴

スケジュール C の B_i の変動を図 3 に示す。 B_i は休憩が始まるまではスケジュール B と同様に練習するため、休憩期間まではスケジュール B と同様に変化している。休憩期間では音符知識は利用されないため、すべての音符種で B_i は減少する。

練習終了時の B_i

すべてのスケジュールの練習終了後の B_i の結果を表 1 に示す。表 1 より、スケジュール A と C では音符の出現頻度に従い、四分音符・二分音符・付点二分音符・全音符の順になっている。スケジュール B では学習する曲が途中で切り替わるため、切り替わったタイミングで出てこなくなる音符である二分音符の B_i は低くなり、付点二分音符の方が大きくなっている。スケジュール C については休憩時間が生まれることで全体的

表 1 楽曲 1~3 に対する練習スケジュール毎の基礎活性のシミュレーション結果. T_s はスケジュールのタイプ.

T_s	全音符	二分音符	四分音符	八分音符	付点二分音符	付点四分音符
A	0.93	1.36	1.95	-2.21	1.31	-2.21
B	0.92	1.64	2.07	-2.35	1.19	-2.35
C	0.90	1.62	2.05	-2.46	1.17	-2.46

表 2 各練習スケジュール後の各音符の選択確率. $s = 0.5$, $m = 90$, T_s は練習スケジュール. 練習スケジュールは A:分散練習, B:集中練習, C:集中練習+休憩, を示す. 小数点以下 4 桁を四捨五入した.

	T_s	音 符 チ ャ ン ク						
		全	付点二分	二分	付点四分	四分	八分	
全	A	1.15×10^{-1}	1.96×10^{-1}	6.89×10^{-1}	0.00	0.00	0.00	
	B	1.11×10^{-1}	5.08×10^{-1}	3.82×10^{-1}	0.00	0.00	0.00	
	C	9.95×10^{-2}	1.98×10^{-1}	7.02×10^{-1}	0.00	0.00	0.00	
入力された	付点二分	A	0.00	1.00×10^0	3.93×10^{-4}	0.00	0.00	0.00
		B	0.00	1.00×10^0	8.4×10^{-5}	0.00	0.00	0.00
		C	0.00	1.00×10^0	3.97×10^{-4}	0.00	0.00	0.00
知覚刺激	二分	A	0.00	2.22×10^{-1}	7.78×10^{-1}	0.00	6×10^{-6}	0.00
		B	0.00	5.71×10^{-1}	4.29×10^{-1}	0.00	3×10^{-6}	0.00
		C	0.00	2.20×10^{-1}	7.80×10^{-1}	0.00	5×10^{-6}	0.00
知覚刺激	付点四分	A	0.00	4.48×10^{-2}	0.18×10^{-4}	7.05×10^{-4}	9.54×10^{-1}	0.00
		B	0.00	1.65×10^{-1}	1.4×10^{-5}	7.99×10^{-4}	8.34×10^{-1}	0.00
		C	0.00	4.63×10^{-2}	1.8×10^{-5}	2.01×10^{-2}	9.34×10^{-1}	2×10^{-6}
知覚刺激	四分	A	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00×10^0	0.00
		B	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00×10^0	0.00
		C	0.00	0.00	0.00	2×10^{-6}	1.00×10^0	2×10^{-6}
知覚刺激	八分	A	0.00	5×10^{-6}	1.8×10^{-5}	0.00	1.00×10^0	7.38×10^{-4}
		B	0.00	2.2×10^{-5}	1.7×10^{-5}	0.00	1.00×10^0	9.58×10^{-4}
		C	0.00	5×10^{-6}	1.9×10^{-5}	2×10^{-6}	0.98×10^{-1}	2.10×10^{-2}

な B_i は減少している. これは最後に音符が出現した後の時間経過 (ステップ数) によって減少するからである.

練習終了時の検索確率

練習終了時に式で求めた検索確率の結果を表 2 で示す. 検索確率については太字の値が検索確率が最も高い値, 表の 1 列目は正解の音符種別, 2 列目はスケジュールを示し, 行はそれぞれの音符の検索確率を示す.

次に検索確率であるが, 付点二分音符, 四分音符はすべての練習スケジュールで正解の選択確率が最も高い. 全音符は全てのスケジュールで, 二分音符はスケジュール B で間違いが発生する確率が最も高い. 付点四分音符, 八分音符は四分音符と検索される確率が最も高かった.

3.2 フレーズ選択に対するシミュレーション方針

前節の結果を踏まえると, 本稿において出現する音符種別については, 付点二分音符, 四分音符については相応に高い検索確率, すなわち誤答を選ぶ確率が少ないという. 類推すれば, 本稿で取り上げた基本フレーズについて, 音符出現率の高い八分音符, 付点四分音符についても概ね音価判定を誤答することは少ないと考えて良いと判断される.

楽曲 A, B でシミュレーションをした結果得られた練習終了時の B_i についての表を表 3 に示す. 練習終了時の B_i についてであるが音符の個数は増えたが両方の曲に登場する音符種別が多かったこともあり休憩があるスケジュール C が低くなるという傾向は先の結果と同じようになったが, それ以外の音符種別が変化することによる B_i の変化はあまり見られなかった.

以上のことから, 本来は音価判定を実行するプロダクションルールが選択される確率を計算したのちにフレーズ選択を実行するプロダクションルールが選択される確率を計算しなければならないが, 音価判定については誤答はないとしてフレーズ選択確率をシミュレーションする.

4 まとめと今後の課題

本稿では, 鍵盤楽器演奏の初期学習支援に対する基礎検討として, 曲中のフレーズに対する演奏習熟促進要素の候補抽出を行うため, まず, プロダクションルールに基づいた単音符での音価選択確率を計算し, 音符種別と練習スケジュール, 練習回数との関係について ACT-R 理論を用いてシミュレーションを用いて考察した. その結果, 音価選択確率, すなわち, 正答の選択には基本的には基礎活性が大きく影響することを示すと

表 3 楽曲 A および B に対する練習スケジュール毎の基礎活性のシミュレーション結果. T_s はスケジュールのタイプ.

T_s	全音符	二分音符	四分音符	八分音符	付点二分音符	付点四分音符
A	-0.97	-0.28	-0.12	0.41	0.63	0.81
B	-1.15	-0.46	-0.05	0.23	0.46	0.64
C	-1.35	-0.64	-0.12	0.12	0.13	0.22

もに、単一音符であれば概ね正しく音価選択を行えることを示した。また、今後の方針として、基本フレーズの選択に対するシミュレーションを行うための方針を示した。今後、フレーズ単位ではつながりを見て認知を行う前前後の関係が複雑な曲では間違い発生がしやすい、複数の曲を同時に練習することなどスケジュールの変化でも間違いが起こるのではないかと、エラー解析のためのシミュレーションを継続する。

謝辞

本研究の一部は科研費 JSPS(19K12232, 代表: 長岡技術科学大学・中平勝子, 22K02840, 代表: 新潟経営大学・落合純) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Christian Lebiere. The dynamics of cognition: An act-r model of cognitive arithmetic. *Kognitionswissenschaft*, Vol. 8, pp. 5–19, 06 1999.
- [2] 山下薫子. 「レッスン」に対する科学的アプローチの動向. *音楽教育学*, Vol. 43, No. 1, pp. 26–33, 2013.
- [3] 後閑祐介, 中平勝子, 北島宗雄. 鍵盤楽器演奏時のアクションスリップ分類と音楽記号の認識能力の関係分析. *情報処理学会第 83 回全国大会*, 2021.
- [4] 水戸博道. 読譜のメカニズム. *音楽教育実践ジャーナル*, Vol. 7, No. 1, pp. 124–130, 2009.

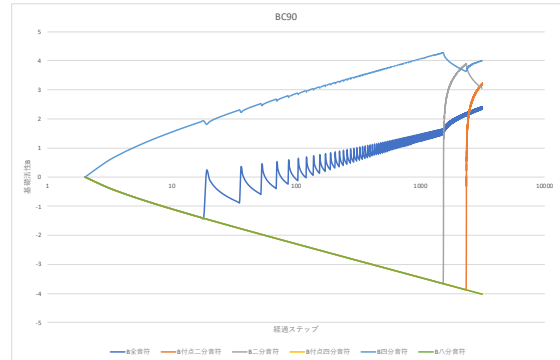


図 2 集中練習：楽曲練習回数 90 回：各音符の基礎活性.

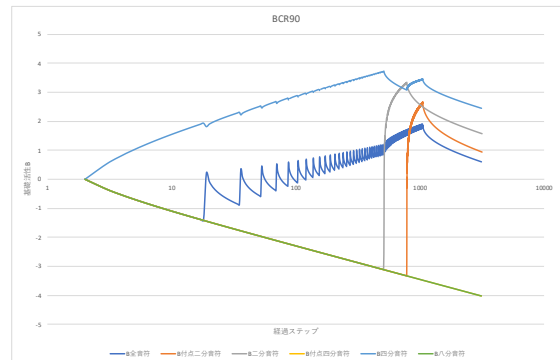


図 3 集中休憩練習：楽曲練習回数 90 回：各音符の基礎活性

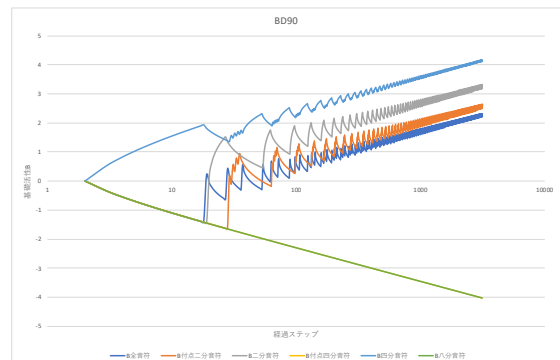


図 4 分散練習：楽曲練習回数 90 回：各音符の基礎活性