

# 知識の個人差を取り入れた認知シミュレーションによる 読譜時エラーの系統化

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

野上 真<sup>†</sup>  
Shin Nogami

北島 宗雄<sup>†</sup>  
Muneo Kitajima

中平 勝子<sup>†</sup>  
Katsuko T. Nakahira

## 1 はじめに

技能教育では技能の熟達を促すことが求められるが学習者の技能熟達のためには指導者が適切な指導を行う必要がある。学習者の習熟状態や個人の持つ癖や発生するエラーの性質は個人ごとに異なる。初心者の起こすエラーであれば技能の中でも初歩的な段階でのエラーが多いため、系統化が行いやすいが、少し慣れてきた段階に入った中級者になると、経過時間、練習回数、練習行動の差によって、エラーの内容が個人ごとに変化し、系統化が困難になる。

現在行われている教育支援の多くでは、山下ら [4] のように、ターゲットとする技能に対して多くの学習者に対して実施されたテストなどの結果や行動記録に対して解析を行うことで難解箇所一般化を行い、指導内容の絞り込みを行うことで、大人数に対する技能教育の改善を提案することが多い。しかし、その方法では、多くの学習者に適応可能な指導の提案は可能であるが、個人ごとに最適な指導法の提案が難しい可能性がある。

また、個人指導の最適化は、例えば、ピアノの個別指導など、個人と一対一で接し、指導者が経験に基づいて学習者の悪い癖を見抜き、その改善を促すことで対応することが多かった。この場合、指導内容の質が指導者の経験や勘によるところが大きくなり、多くの者に対して技能指導を請け負わねばならない状況では効率的とは言えない。加えて、学習者のエラーを指導者が正確に分類し、学習者個人に適合した指導を行うことが求められるが、指導の質が指導者の経験則や考え方に影響されるため、その質を向上するための支援が求められる。

そこで、代案の一つとして、指導者側のエラー発生原因の理解を認知過程の理解によるアプローチによって促すことを提案する。

本研究では技能教育の中でも楽器演奏をモデルとし、弾き間違いは認知過程の中の知覚から認知の段階である読譜で発生するものと仮定して、認知アーキテクチャの ACT-R における所持している記憶の検索を利用してシミュレーションを行う。

読譜の原因として、以下を挙げることができる。

1. 個人の持つ利用可能な知識の量の差
2. 演奏する中での時間制約によって発生する知識検索の失敗

本研究では時間的制約によらない要素である最初の原因に焦点

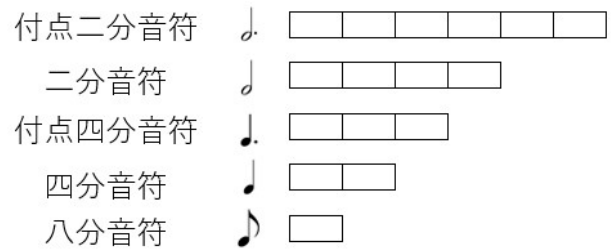


図1 音価リスト

を置き、そのパラメータを変化させることで間違いパターンなどの個人特性の再現を目指す。

## 2 シミュレーション実験の枠組み

### 2.1 フレーズ的设计

今回の実験では楽曲のリズムフレーズ判定を ACT-R を援用した認知シミュレーションで行う。本稿では、フレーズとは複数音価のまとまりとし、1 小節で記述されるとした。また、利用する音価種は、小学校で学習する音価種として図 1 に示した 5 種類の音価を利用する。この時、最小音価を持つものは八分音符である。また、簡素化のため、本実験では休符は使用しないこととする。

本実験で利用する記憶チャンクは図 2 のように記述される。図 2(a) の様な表象が視覚情報として得られるとする。図中には示されていないが、楽曲に対しては、必ず拍子記号の記載があり、ここでは拍子記号は既に読み取っているものとする。該当小節の場合、4 分の 3 拍子という指示があったことになる。この表象に対して、次の様なチャンク構造を持たせる。

チャンク内のスロット数は、理論上、最小音価のみで 4 分の 3 拍子を表現すると、6 つ用意する必要がある。そのため、スロットである Note は 1 から 6 までを用意する。各スロットには表象として見える音符を入力するが、この時、1 スロットに 1 表象分の音符を入力する。図の例の場合だと、Note1 および Note2 には、それぞれ八分音符が入力され、八分音符は旗で接続されているが、スロットへの入力という意味では、旗は分割して入力する。Note 3 および Note 4 には、それぞれ次の表象である四分音符が入力される。Note 5 および Note 6 には、入力される表象が存在しないため、そのことを示す nil 記号を

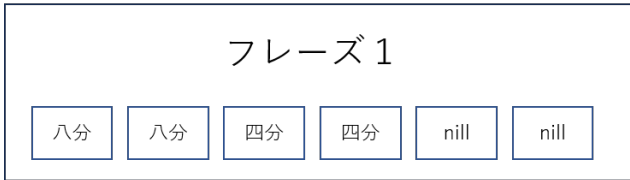
<sup>†</sup> 長岡技術科学大学



(a) 視覚情報

フレーズ1
Isa 覚えているフレーズ
Note1 八分音符
Note2 八分音符
Note3 四分音符
Note4 四分音符
Note5 nil
Note6 nil
Name フレーズ1

(b) ACT-R式チャンク表現



(c) 記譜的チャンク表現

図 2 チャンク例

入力する。これら一連の情報を Isa 情報として“覚えているフレーズ”，フレーズ名称 (Name) を“フレーズ 1”とし，Isa, Note 1~ Note 6, Name で構成されるチャンクをフレーズ 1 と命名する。以上の構造を示したものが，図 2(b) である。

(b) を実際のプログラムに実装する場合，重要となるのはチャンク内のスロット情報である Note  $n$  の情報である。この部分を取り出し，プログラムで扱いやすいデータ列としてデータ構造を作り直したものが，図 2(c) である。

この時，チャンク内の各音価スロットの長さは八分音符が単位となっているが全音符種別で 1 スロットにつき一つの音符が記録される。利用できるチャンクは全 30 種類となる。

## 2.2 楽曲の設計

本実験では前述のフレーズパターンを利用して楽曲を作成する。楽曲は練習曲を想定する。練習曲では数パターンの音価列パターンの繰り返しが多く，比較的短い楽曲を想定されることが多い。また一般的な楽譜では 4 小節を 1 列として，3~4 段で 1 ページが構成される。よって楽曲の長さは 16 小節を 1 曲として設定する。

利用するフレーズ種は 1 曲中に 1, 2, 4 種類の 3 通りを設定する。今回使用するフレーズ種を図 3 に示す。

全楽曲に共通する条件として，「曲中最後の小節 (16 小節目) には本実験内最長音である付点二分音符一つで構成されるフレーズ種を設定する」を設ける。楽典の初心的な法則として，楽曲の最後は調音をとる和音や単音によって終了する場合が多

いからである。

各楽曲のフレーズ配置であるが 2 種類の場合のパターンを図 4 に，4 種類のパターンを図 5 に示す。2 種類の場合には設定したフレーズが交互に登場する図 4 中 (1)，一つのフレーズが 2 回ずつ登場する (2)，4 回ずつ登場する (3)，8 回ずつ登場する (4) の 4 種を設定する。フレーズを 4 種利用の場合では，4 つが順番に 1 回ずつ，2 回ずつ，4 回ずつ登場する図 5 中 (1) ~ (3) の 3 種類を設定する。また，楽曲内に登場するフレーズチャンクの種別についてはランダムに選択する場合と作為的にチャンク内の登場音符数が異なるフレーズチャンクを選択する場合の 2 種類を設定する。このパターンの変化によって各チャンクの活性値の変化を比較する。

## 2.3 フレーズ認知を記述する活性化方程式

各チャンクの活性値は以下の活性方程式で求められる [1]。

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

$$B_i = \beta + \ln \left( \sum_k t_k^{-0.5} \right) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2)$$

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。基礎活性はチャンクが生成されたタイミングで初期値  $\beta$  を得る。また，基礎活性にはノイズ  $\varepsilon$  が発生する。ノイズには以下の 2 種類が存在する。

- $\varepsilon_1$ : 基礎活性初期値のゆらぎとして発生するノイズ，元から持っている記憶の差によって発生する
- $\varepsilon_2$ : 記憶を利用する際に発生するノイズ，チャンク検索の時間制約によって値が変化する

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  $R_{ji}$  はチャンク内の音価スロットに音符  $j$  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。

$$R_{ji} = \frac{\alpha \times R_{ji}^* + F(C_j) \times \frac{P_e(N_i|C_j)}{P_e(N_i)}}{\alpha + F(C_j)} \quad (3)$$

本実験では， $j$  を音符， $i$  を各フレーズチャンクとする。フレーズ種によっては同じ音符が複数回登場する場合が存在する。その際に同じ音符ではあるがフレーズを区別する際には存在する音価と各音価の位置によって判定されるため， $j$  は同じ八分音符でも「スロット 1 に入る八分音符」のように位置が違ふものは別の要素として定義される。

## 3 実験結果

例として，先に図 3 で示した特定のフレーズ 5 種を利用した楽曲 3 種を利用した結果を報告する。

フレーズは以下 2 つの基準を満たすように 4 つを選定した。



図 3 フレーズリスト

(1)	A B A B A B A B A B A B A B A E
(2)	A A B B A A B B A A B B A A B E
(3)	A A A A B B B B A A A A B B B E
(4)	A A A A A A A A B B B B B B B E

図 4 フレーズ配置 (2 種利用)

(1)	A B C D A B C D A B C D A B C E
(2)	A A B B C C D D A A B B C C D E
(3)	A A A A B B B B C C C C D D D E

図 5 フレーズ配置 (4 種利用)

- チャンク内の音価種別が 1 ~ 3 種類それぞれがある
- チャンク内の登場する音価の数がすべて異なる

実験に利用した楽曲はそれぞれ 4 種のフレーズが 1 回ずつ順に登場する図 5 内 (1) となる楽曲 1, 1 つのフレーズが連続して 2 小節登場する図 5 内 (2) となる楽曲 2, 1 つのフレーズを 4 小節ずつ繰り返す図 5 内 (3) となる楽曲 3 の 3 種類を設定した。楽曲 1 回練習につき図 3 内のフレーズ B ~ D については 4 回, フレーズ E は 3 回, フレーズ A は 1 回登場する。

後関らの研究 [2, 3] によると単音の学習の場合にはチャンクの活性には  $A_i$  を構成する要素の内, 基礎活性  $B_i$  が大きく影響を与えることが示唆されているため, それに倣い, 本稿では練習後のフレーズごとの基礎活性に着目して分析を行う。各楽曲毎に 10 回連続で読譜をした状況を想定し, 活性方程式に基づいて活性を求めた。各楽曲練習後の各チャンクの基礎活性の振る舞いを図 6 (a) ~ (e) に示す。

### 3.1 楽曲内での各フレーズの $B_i$ の振る舞い

楽曲 1 ~ 3 の  $B_i$  の振る舞いを図 6(a) ~ (c) に示す。大きく分けてフレーズ A, B, C の 3 つ, D, E の 3 通りの振る舞いが見られる。基礎活性は利用された時点で強化され, 利用した回数が多いほどに強化される。フレーズ A, B, C の 3 種は楽曲内で 4 回登場し, A → B → C の順番で登場するため, 似た振る舞いを持ち, 値の変化も近くなっている。フレーズ D は A ~ C と比較すると, 楽譜内の登場箇所が 1 つ終止形となるフレーズ E に置換されているため, 値の推移が A ~ C よりも低くなっている。フレーズ E は楽曲毎に 1 回のみ利用され, 全楽曲で共通の振る舞いを見せている。 $B_i$  はチャンクの利用回数に応じて大きくなるため, 登場回数の多いフレーズ程  $B_i$  の値は大き

くなっている。

### 3.2 読譜エラーの系統化

読譜エラーの系統化を行うにあたり, 楽曲 1-楽曲 3 における特徴的なフレーズ (フレーズ A, フレーズ D) の振る舞いを確認する。

フレーズ A, D の  $B_i$  の振る舞いを図 6(d), (e) に示す。1 つのフレーズが連続して登場する回数の多い楽曲 3 の  $B_i$  が最も高くなっている。 $B_i$  は利用されてから次に利用されるまでの経過時間によって減少する。これにより, 1 種のフレーズが 4 回連続で利用される楽曲 3 では連続で利用される時点では  $B_i$  では減衰することなく強化され, 使用されなくなった時点から次に利用されるまでの期間で大きく減衰している。

以上の結果より “フレーズの活性は短期間に連続して利用し, 時間を空けずに繰り返すことで効果的に上昇する” と考えられる。読譜エラーには基礎活性を原因とする以下の種類があると考えられる

#### ● 活性の低さによるエラー

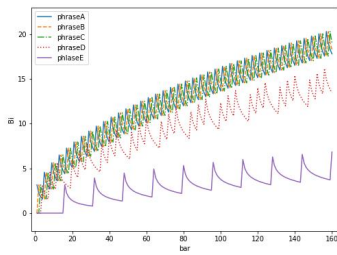
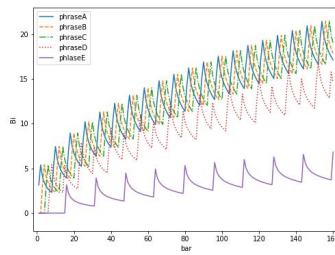
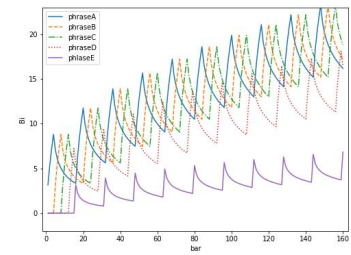
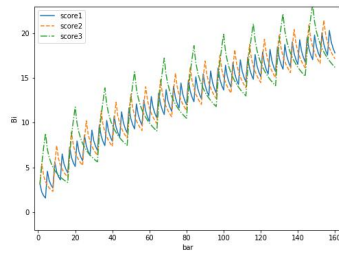
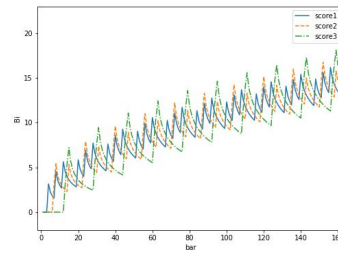
利用回数が他のフレーズより 1 回少なくなるフレーズ D では利用回数が少なく楽曲 3 のように強化と減衰の波が大きくなるような状況ではチャンク自体の活性が低くなり, 読譜時に忘れるようなエラーが発生する。

#### ● 活性の高騰によるエラー

フレーズの利用回数が多くなるようなフレーズ A では, 楽曲 3 のように連続して同一フレーズを利用すると基礎活性が大きく強化されることで, 次も使うかも, という思い込みが発生する。

## 4 まとめと今後の課題

本稿では, 読譜時に発生するエラーの系統化を目指して, プロダクションルールによる楽曲練習の認知シミュレーションを行い, 利用可能な知識となるフレーズの活性値を活性方程式により求め, 先行研究により効果が大きいと予測された基礎活性についての考察を行った。結果として, フレーズは利用回数によって強化され, その程度は連続して利用される回数によって決定されることが示された。これにより, 基礎活性の変化によって発生するエラーについての分類を提示することを行った。今後は時間制約に影響されて生まれる検索の際のノイズや競合するフレーズチャンク間の期待利得, 登場する音価種と音価の数によって変化する原始活性についての検討, 継続的な実験から行い, 系統化分類を行っていく。

(a) 楽曲 1 の練習後  $B_i$ (図 5 の (1))(b) 楽曲 2 の練習後  $B_i$ (図 5 の (2))(c) 楽曲 3 の練習後  $B_i$ (図 5 の (3))(d) フレーズ A の練習後  $B_i$ (e) フレーズ D の練習後  $B_i$ 図 6 楽曲練習後における  $B_i$  の時間変化.

## 謝辞

本研究の一部は科研費 JSPS( 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] John R. Anderson and Christian J. Lebiere. *The Atomic Components of Thought (English Edition)*. Psychology Press, Kindle 版, 1 2014.
- [2] 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.
- [3] 後閑祐介, 北島宗雄, 中平勝子. 音価判定にかかる知識獲得・利用とエラー発生過程の ACT-R シミュレーション. 第 84 回全国大会講演論文集, 第 2022 巻, pp. 181–182, feb 2022.
- [4] 山下龍生, 菊池拓男. 効率的な熟練技能の訓練計画選定における最適化問題の適用について. 工学教育, Vol. 68, No. 1, pp. 58–62, 2020.