

# 進化言語学に基づいた楽譜解析手法の提案

須藤 洸基<sup>1,2,a)</sup> 東条 敏<sup>1</sup>

**概要：**音楽と言語は音や文字（楽譜や文）を介して人間に認識されるという共通点を持っており、音楽のルーツは言語と同じであるという研究も報告されている。音楽と言語が同じルーツを持つのであれば、言語に関する知見を音楽に適用することが可能であると考えられる。我々は、Kirby(1998)が提案した繰り返し学習モデル (Iterated Learning Model) を基に、楽譜を言語とみなして言語獲得するモデルを考案した。繰り返し学習モデルでは、合成性と再帰性が言語に発現する過程をシミュレーションするモデルである。合成性とは、文を構成する要素（単語や節、句等）の順番とそれらの意味によって文の意味が決定する性質である。再帰性とは、「ある文を構成する要素」の中に「ある文を構成する要素」が再帰的に含むことのできる性質である。我々はこの繰り返し学習モデルの合成性と再帰性を発見する言語獲得に注目して、楽譜のシンボル列の合成性と再帰性を発見するモデルを構築した。本研究では、ブルグミュラー 25 の練習曲を用いて各楽譜を音名でシンボル列化して、我々のモデルで合成性と再帰性の発見を行った。その結果として獲得された言語を音楽知識に基づいて分析してモデルの評価を行った。

**キーワード：** Linguistic Evolution, Language Acquisition, 音楽情報処理, 楽譜解析

## 1. はじめに

音楽は楽譜として記述され、演奏者が楽譜を見て演奏した音を耳で認識する。このような音楽がとる形態は、言語とよく似ている [1], [15]。言語もまた文字で記述され、声として音で他者に伝達できる。これらの類似性から人間以外の動物の言語は音楽との境界は曖昧であり、例として、小鳥の鳴声を挙げる。小鳥の鳴声は我々には一種の音楽のように聞こえるが、この歌声の中には文法が存在する [2], [13]。ダーウィン (Charles Darwin) は、人間にとって音楽は男女間で愛を伝える手段であったはずと考えた。言語が発達した人間は、明確な意味を持つ言語を用いてコミュニケーションを行う。一方で、音楽は明確な意味を持たないが、どの時代・どの文明にもあまねく存在している。音楽と言語は明らかに異なるものであるが、共通点が存在していて相互に知見を応用できる見込みがある。このことから、計算機による音楽の理解とその応用（自動伴奏、自動採譜、自動作曲、作曲支援、作曲者の特徴の自動抽出）に言語で培われたアプローチが試みられている。

これらの研究では、自然言語処理に関する研究で発達した

確率モデル [21], [22] とルールベースの解析手法 [3], [20] が多い。また、自然言語処理の研究を由来とするわけではないが、同じくルールベースの解析手法として GTTM(Generative Theory of Tonal Music[7]) に基づいた解析手法の提案がある [4], [11]。これらの手法では、自然言語処理のように既成の音楽（専門的な音楽知識）を外側から観察して規則を探し出すことによって人間の感性に近い音楽解析を目指している。

また、自然言語処理だけでなく言語進化の知見も音楽の研究に応用されている [19]。言語進化とは、言語を観察してその規則を探し出すのではなく、どのような仕組みがあれば人間言語の性質を持つ言語が作り出されるのか（言語を作り出すシステムを構築しようとする）という観点からの言語へのアプローチである [16], [17]。

言語進化を模したスライドホイッスルを使った音楽の進化実験では、より簡単で単調な吹き方になるのではなく、構造のある吹き方へと進化することが報告されている [14]。また、リズムに関してドラムをたたくパターンに関する実験が報告されている [10]。伝達を繰り返すことで構造のないランダムなリズムから構造を持つリズムへと変化する。これらの報告は、伝達の際に生じるボトルネック（情報の欠落）が構造化を促進させることを示している。また、これらの研究は明確な意味を持たない音楽が人間文化に残り続ける理由の一端を示しているようにも考えられる。音楽

<sup>1</sup> 北陸先端科学技術大学院大学  
Japan Advanced Institute of Science and Technology  
<sup>2</sup> (独) 日本学術振興会特別研究員 DC1  
Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science (DC1)  
a) hiroki.sudo@jaist.ac.jp

に言語進化の知見を取り入れることで、自然言語処理の手法空では見つけられない新奇な発見ができることを示している。

上記の音楽の進化実験は、Simon Kirby が提案した繰り返し学習モデル [5], [6], [18] を模している。Kirby はコンピュータシミュレーションによって、世代交代による伝達のボトルネックとシンプルな学習システムだけで、ランダムな言語から構造を持つ言語へと進化するシミュレーションモデルを提案した。我々もこのモデルを基にして様々な言語進化のコンピュータシミュレーションを行ってきたが [8], [9], [12], [23], 獲得された構造的な言語が現実世界で有用な構造であるかどうかは、計算機に閉じている実験のため判定しきれない。コンピュータシミュレーションであることによって人間の言語進化という巨大な時間スケールを扱うことができるのだが、実験と現実世界が乖離してしまっていた。

言語の文字に相当する楽譜は、言語とは違い単語のような明確な切れ目を与えることはできない。多くの人から支持される古典音楽は和声学に基づいて作編曲されており、和音という単語の並びによってメロディの性質が決められる。例えば、 $I \Rightarrow V_7 \Rightarrow I$  という進行はカデンツと呼ばれる終了感を持つ和音列となっている。このような和声学という規則にも恣意性があり、どの和音であるかどの進行であるかは見方によってさまざまな解釈が存在して一意に定められるものではない。これは、音楽が和声学という規則だけではなく直感的な感覚に基づいて作曲されるためである。このように言語と比べて曖昧さを持ち一貫した規則を見つけにくい音楽であるが、言語進化のように音楽を構成する内部のシステムにせまることで一貫した規則を見つけ出せるかもしれない。

我々は音楽と同じ起源を持つ言語の手法の中でも言語進化の手法を用いて、和声学という知識を使わずに和声学と同様な構造の発見を試みた。具体的には、Kirby の繰り返し学習モデルで使われている学習システムを基に楽譜の解析システムを構築した。これは言語進化シミュレーションで使われている学習システムを構造化を学習するシステムとして音楽の構造を学習するためである。本研究では、繰り返し学習モデルの学習システムを音楽の構造解析システムとして再構築して、言語進化の手法を取り入れた楽譜解析手法を提案する。この楽譜解析手法の有用性は、音楽という現実世界の事柄に対して繰り返し学習モデルの学習システムの適用が有用かどうかを示すものなので、言語進化においてコンピュータシミュレーションと現実世界を結びつける役割も果たす。

## 2. 繰り返し学習モデル

Kirby の繰り返し学習モデルは、親と子の垂直伝達、子の汎化学習を繰り返す (図 1) ことによって無規則であった

言語が構造を持つ言語へと進化する様子をシミュレーションできる。垂直伝達とは、子が親以外のインプットを受け付けない伝達である。すなわち、子は 1 世代前の親からのみ言語の伝達を受けるので、集団の中での言語進化は除外している。子は親の言語が生成できる発話をすべて知ることにはできない (プラトンの問題) ため、親から聞いた発話を汎化学習して言語を獲得する。

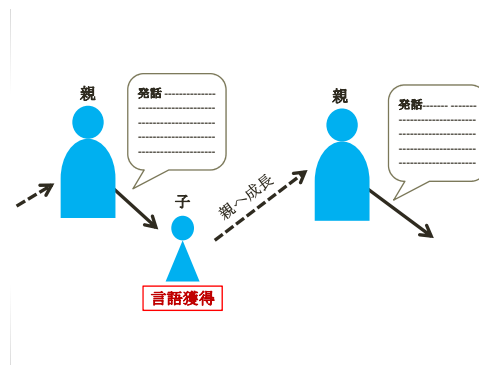


図 1 Kirby の繰り返し学習モデルの概要

### 2.1 繰り返し学習モデルでの言語知識

このモデルにおける言語知識は確定節文法で表現される生成規則の集合で構成される。確定節文法とは形式文法の文脈自由文法の拡張であり、終端記号と非終端記号に文法条件を加えたものである。定義は以下のとおりである。

- 非終端記号  $N$  の有限集合  $V_N$
- 条件  $C$  の有限集合  $V_C$
- 条件付き非終端記号  $N_C$  の有限集合  $V_{N_C} = V_N \times V_C$
- 終端記号  $T$  の有限集合  $V_T$
- 生成規則 ( $\alpha \rightarrow \beta$  ただし、 $\alpha \in V_{N_C}$ ,  $\beta \in V^+$ ,  $V = V_{N_C} \cup V_T$ , 条件 :  $c$ ) の有限集合  $P$
- 開始記号  $S \in V_{N_C}$

確定節文法の生成規則では、必ず左辺は一つ条件付き非終端記号となる。生成規則の集合から導出される終端記号列がその言語の発話となる。そして、条件  $C$  は二項述語項構造をとり、その発話の意味を指す。右辺にある非終端記号の条件は左辺の意味の一部を参照する。例えば、言語が下記のような生成規則の集合出会った場合 (表 1), 生成可能な文字列は “johnlovesmary”, “johnlikesmary”, “marylovesjohn”, “marylikesjohn” の 4 種類となる ( $love(john, john)$  のような意味は除く)。

| $r_i$ | 発話規則  |
|-------|---|
| $r_1$ | $S/love(x_2, x_3) \rightarrow N_1/x_2 \text{ loves } N_1/x_3$ |
| $r_2$ | $S/like(x_2, x_3) \rightarrow N_1/x_2 \text{ likes } N_1/x_3$ |
| $r_3$ | $N_1/john \rightarrow john$                                   |
| $r_4$ | $N_1/mary \rightarrow mary$                                   |

表 1 エージェントの言語知識の例

## 2.2 繰り返し学習モデルでの学習システム

子は親からすべての意味に対する発話を教えてもらうことはできない。そのため、子は親から受け取った発話から汎化学習して親の言語を獲得しようと試みる。子の持つ学習システムは chunk, merge, replace という 3 つの学習を自分の言語知識に変化がなくなるまで繰り返し行う。

### 2.2.1 繰り返し学習モデルの chunk

chunk は 2 つの発話規則の意味と発話に共通点を見つけて、発話規則を汎化する操作である。chunk により言語知識に新しい非終端記号が増える。

$$\begin{aligned} S/\text{like}(\text{mary}, \text{john}) &\rightarrow \text{marylikesjohn} \\ S/\text{love}(\text{mary}, \text{john}) &\rightarrow \text{marylovesjohn} \\ &\downarrow \text{chunk} \\ S/X_1(\text{mary}, \text{john}) &\rightarrow \text{mary } N_0/X_1 \text{ esjohn} \\ N_0/\text{like} &\rightarrow \text{lik} \\ N_0/\text{love} &\rightarrow \text{lov} \end{aligned}$$

### 2.2.2 繰り返し学習モデルの merge

merge は同じ意味かつ同じ発話である発話規則を見つけて非終端記号を統一する操作である。merge により言語知識にある非終端記号が統合される。

$$\begin{aligned} S/\text{hate}(X_2, X_3) &\rightarrow N_1/X_2 \text{ hates } N_2/X_3 \\ N_1/\text{gavin} &\rightarrow \text{gavin} \\ N_1/\text{pete} &\rightarrow \text{pete} \\ N_2/\text{gavin} &\rightarrow \text{gavin} \\ &\downarrow \text{merge} \\ S/\text{hate}(X_2, X_3) &\rightarrow N_2/X_2 \text{ hates } N_2/X_3 \\ N_2/\text{gavin} &\rightarrow \text{gavin} \\ N_2/\text{pete} &\rightarrow \text{pete} \end{aligned}$$

### 2.2.3 繰り返し学習モデルの replace

replace は文規則に単語規則を適用して発話規則を汎化する操作である。replace により言語知識の文規則を既存の非終端記号で表現する。

$$\begin{aligned} S/\text{admire}(\text{john}, \text{pete}) &\rightarrow \text{johnadmirespete} \\ N_3/\text{admire} &\rightarrow \text{admire} \\ &\downarrow \text{replace} \\ S/X_1(\text{john}, \text{pete}) &\rightarrow \text{john } N_3/X_1 \text{ pete} \\ N_3/\text{admire} &\rightarrow \text{admire} \end{aligned}$$

## 2.3 繰り返し学習の例

繰り返し学習によって、ランダムな発話だった言語が構造を持つ言語へと変化する。実際のシミュレーションモデルでは、表 2 のようになる。この言語では、10 個の規則で 100 種類の意味を表現することができる。一方で、ランダムな発話をする言語は意味と発話が一対一になるため、100 種類の意味を表現するためには 100 個の規則が必要になる。

| $r_i$    | 発話規則  |
|----------|---|
| $r_1$    | $S/\text{detest}(x_2, x_3) \rightarrow N_1/x_2 \ N_1/x_2 \ f$                         |
| $r_2$    | $S/\text{hate}(x_2, x_3) \rightarrow w \ N_1/x_3 \ f \ N_1/x_2 \ jf$                  |
| $r_3$    | $S/\text{like}(x_2, x_3) \rightarrow N_1/x_2 \ \text{afp} \ N_1/x_3 \ \text{fr}$      |
| $r_4$    | $S/\text{love}(x_2, x_3) \rightarrow \text{gmostpf} \ N_1/x_3 \ N_1/x_2 \ \text{sin}$ |
| $r_5$    | $S/\text{admire}(x_2, x_3) \rightarrow \text{lm} \ N_1/x_3 \ N_1/x_2 \ f$             |
| $r_6$    | $N_0/\text{gain} \rightarrow r$   |
| $r_7$    | $N_0/\text{pete} \rightarrow c$   |
| $r_8$    | $N_0/\text{heather} \rightarrow u$  |
| $r_9$    | $N_0/\text{mary} \rightarrow j$   |
| $r_{10}$ | $N_0/\text{john} \rightarrow e$   |

表 2 言語進化によって獲得される言語知識の例

## 3. 提案モデル

本研究では、楽譜を暗黙的な構造のある文字列としてその構造を発見するモデルを提案する。Kirby の繰り返し学習モデルでは、意味と文字列、それぞれの共通点に基づいて学習する。しかし、同じ楽曲でもさまざまな和声の解釈があるように楽譜に意味を割り当てることは難しい。そこで、我々は文字列の共通点だけから構造を学習するモデルを提案する。つまり、文字列の共通点から構造が見つけれせる場合にそれに対応する架空の意味を割り振るように学習する。

### 3.1 提案モデルの chunk

2 つの規則間のシンボル列が chunk できるかどうかを判定して、chunk できるならそれを表現する規則を構築する。

$$\begin{aligned} S/M_1 &\rightarrow \text{marylikesjohn} \\ S/M_2 &\rightarrow \text{marylovesjohn} \\ &\downarrow \text{chunk} \\ S/M_3(x_1) &\rightarrow \text{mary } N_1/x_1 \ \text{esjohn} \\ N_1/M_4 &\rightarrow \text{lik} \\ N_1/M_5 &\rightarrow \text{lov} \end{aligned}$$

$S/M_1(x_1) \rightarrow \text{mary } N_1/x_1 \text{ esjohn}$   
 $S/M_2 \rightarrow \text{marylovesjohn}$   
 $\downarrow \text{chunk}$   
 $S/M_{1,x_1} \rightarrow \text{mary } N_1/x_1 \text{ esjohn}$   
 $N_1/M_3 \rightarrow \text{lov}$

$S/M_1 \rightarrow \text{johnadmirespete}$   
 $N_1/M_2 \rightarrow \text{admire}$   
 $\downarrow \text{replace}$   
 $S/M_3(x_1, ) \rightarrow \text{john } N_2/x_1 \text{ spete}$   
 $N_2/M_2 \rightarrow \text{admire}$

$S/M_1(x_1, x_2) \rightarrow \text{mary } N_1/x_2 \text{ } N_2/x_1$   
 $S/M_2(x_1, x_2) \rightarrow \text{maryloves } N_3/x_1$   
 $\downarrow \text{chunk}$   
 $S/M_3(x_1) \rightarrow \text{mary } N_4/x_1$   
 $N_4/M_4(x_1, x_2) \rightarrow N_1/x_2 \text{ } N_2/x_1$   
 $N_4/M_5(x_1) \rightarrow \text{loves } N_3/x_1$

$S/M_1(x_1) \rightarrow \text{john } N_1/x_1 \text{ spete}$   
 $N_1/M_2x_1 \rightarrow \text{john } N_2/x_1$   
 $\downarrow \text{replace}$   
 $S/M_3, x_1 \rightarrow N_3/x_1 \text{ spete}$   
 $N_3/M_2(x_1) \rightarrow \text{john } N_2/x_1$

### 3.2 提案モデルの merge

2つの規則間で同じ右辺であれば意味と非終端記号を統一する。この意味とカテゴリの統一は言語知識全体に適用される。

$S/M_1(x_1, x_2) \rightarrow N_1/x_1 \text{ respects } N_2/x_2$   
 $N_1/M_2 \rightarrow \text{gavin}$   
 $N_1/M_3 \rightarrow \text{pete}$   
 $N_2/M_4 \rightarrow \text{gavin}$   
 $\downarrow \text{merge}$   
 $S/M_1(x_1, x_2) \rightarrow N_3/x_1 \text{ respects } N_3/x_2$   
 $N_3/M_5 \rightarrow \text{gavin}$   
 $N_3/M_3 \rightarrow \text{pete}$

$S/M_1(x_1, x_2) \rightarrow N_1/x_1 \text{ respects } N_2/x_2$   
 $N_1/M_2(x_1, x_2) \rightarrow N_1/x_1 \text{ respects } N_2/x_2$   
 $\downarrow \text{merge}$   
 $S/M_1(x_1, x_2) \rightarrow N_1/x_1 \text{ respects } N_2/x_2$

### 3.3 提案モデルの replace

片方の右辺が他方の右辺を含んでいれば、長い方のシンボル列を短い方のシンボル列で表現できるように規則を書き換える。

## 4. 楽譜の解析

提案モデルの妥当性の検証として、ブルグミュラー 25 の練習曲を対象に実験を行った (図 2)。

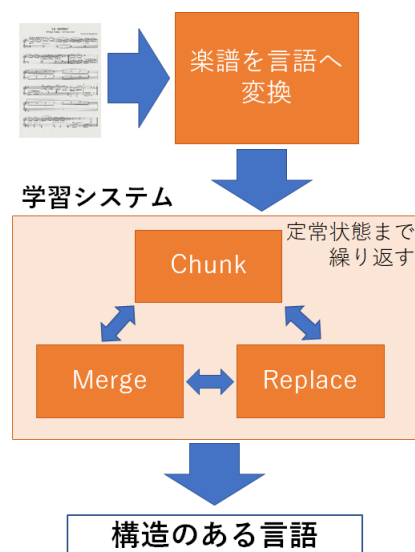


図 2 楽譜解析の概略図

一般的な和声解析の研究では、音声データを使う場合とデジタル化された楽譜データを使う場合がある。本研究では、楽譜を言語として扱うためデジタル楽譜データを使い、繰り返し記号・小節・拍といった和声学の知識がなくても理解できるシンプルな要素を使って楽譜をシンボル化する。各小節で拍単位の構成音名でシンボル化する (図 3)。ただし、繰り返し記号と曲の終止記号は人手で与えるものとする (図 4)。これにより、学習システムを用いて文法規則を自動生成する。

ブルグミュラー 25 の練習曲をシンボル列に変換して、



$$C_1/M_1 \rightarrow [C E F G] [C D E G] [C E F G] [C D E G]$$

図 3 小節単位のシンボル列への変換



$$S/M_1(x_1 x_2 x_3 \dots) \rightarrow C_1/x_1 C_2/x_2 C_3/x_3 \dots$$

$$C_1/M_2 \rightarrow [C E G][C D E G][C E G][C D E G]$$

$$\vdots$$

図 4 楽曲全体のシンボル列への変換

提案モデルにて知識に変化がなくなるまで学習を繰り返した。学習で得られた言語知識を利用して、各楽譜のパーサツリーを作成した。このパーサツリーにより、以下のことが解析可能であることが示唆された。

- (1) 和声外音が安定な和音に回帰する構造
- (2) フレーズの区切り

#### 4.1 和声外音の安定な和音への回帰

図 5 は 4 分の 4 を含む拍の La candeur という楽曲の第一小節である。この小節は、図 6 として解析された。1 拍目と 3 拍目に CEG という強く協和する和音があって、2 拍目と 4 拍目は CDEG という和声外音が混じった和音で構成されている。2 拍目の和音は強く協和する 3 拍目の和音と組み合わせられることで安定な和音 (CEG) へと回帰する。このような和音の安定の構造がパーサツリーから読み取ることができる。

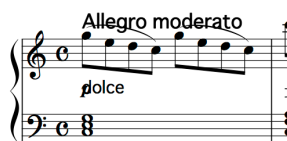


図 5 和声外音の和音への回帰例 (ブルグミュラー 25 の練習曲から 'La candeur' 楽譜抜粋)

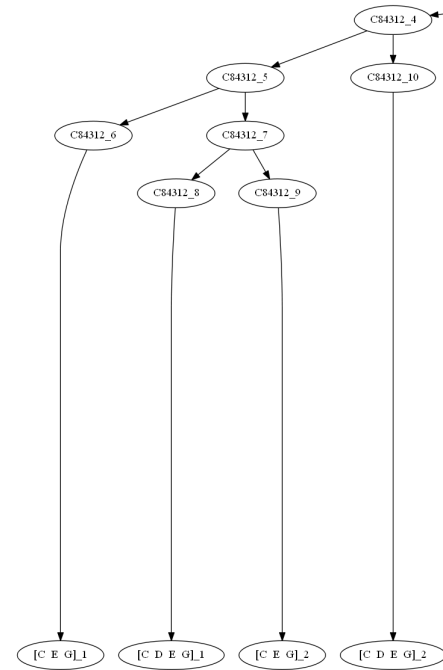


図 6 和声外音の和音への回帰例 (ブルグミュラー 25 の練習曲から 'La candeur' パースツリー抜粋)

#### 4.2 フレーズの区切り

音楽は 4 小節、8 小節、12 小節といったように 4 の倍数の小節数で 1 フレーズとすると安定した感覚が生じる。実際、La candeur でも 8 小節ごとにフレーズの切れ目を感じさせる。図 7 の最後の 14 小節は、前 8 小節と後 6 小節に分かれて感じられるが、繰り返し記号による区切りはない。しかし、図 8 では 8 小節と 6 小節に分割している構造が確認できた。これは、提案モデルによって区切りの構造を見つけ出したといえる。



図 7 フレーズの区切り例 (ブルグミュラー 25 の練習曲から 'La candeur' 楽譜抜粋)

### 5. おわりに

本研究では、言語進化に関する研究を基に楽曲の解析モデルの提案を行った。我々のモデルは、音楽知識を用いずに楽曲構造を解析することができるかどうかを試みたもの

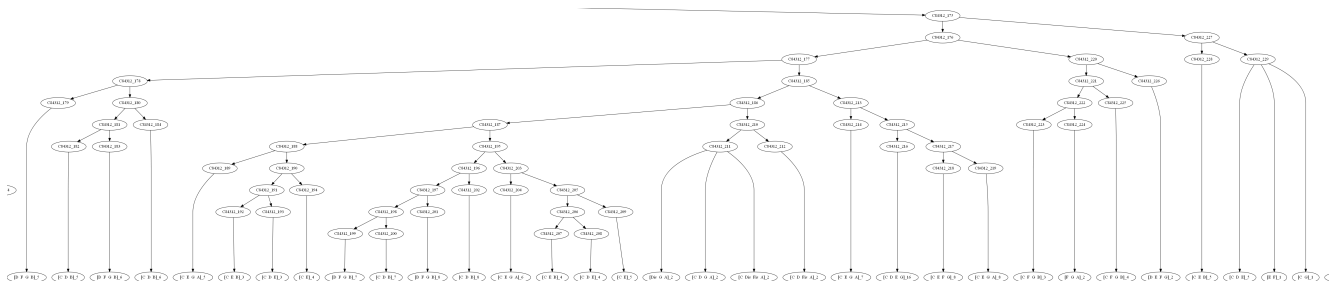


図 8 フレーズの区切り例 (ブルグミュラー 25 の練習曲から ‘La candeur’ パースツリー抜粋)

である。その実験として、ブルグミュラー 25 の練習曲からフレーズの切れ目と和音の解決を行う規則を獲得して各曲のパーズツリーを構築した。これにより、本研究で提案したモデルは我々の持つ音楽知識の一部と同じ結果を示せる可能性があることがわかった。しかし、楽曲の解析データで取得したパーズツリーデータは巨大で人手での解析には時間がかかる。今後の課題は、大量の解析データを自動的に解析する方法を追究することである。

謝辞 本研究は JSPS 特別研究奨励費、基盤研究 (A) JP16H01744 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] Asano, R. and Boeckx, C.: Syntax in language and music: what is the right level of comparison?, *Front Psychol*, Vol. 6, p. 942 (online), DOI: 10.3389/fpsyg.2015.00942 (2015). 26191034[pmid].

[2] Berwick, R. C., Okanoya, K., Beckers, G. J. and Bolhuis, J. J.: Songs to syntax: the linguistics of birdsong, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 15, No. 3, pp. 113 – 121 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.01.002> (2011).

[3] Fukunari, T., Arn, S. and Tojo, S.: CCG analyzer with Tonal Pitch Space for non-classical chords, *2016 Eighth International Conference on Knowledge and Systems Engineering, KSE 2016, Hanoi, Vietnam, October 6-8, 2016*, pp. 239–246 (2016).

[4] Hamanaka, M., Hirata, K. and Tojo, S.: Computational Music Theory and Its Applications to Expressive Performance and Composition (2013).

[5] Kirby, S.: Learning, Bottlenecks and the Evolution of Recursive Syntax, *In E. Briscoe (Ed.), Linguistic*, University Press (1998).

[6] Kirby, S., Griffiths, T. and Smith, K.: Iterated learning and the evolution of language, Vol. 28, p. 108114 (2014).

[7] Lerdahl, F. and Jackendoff, R.: *A generative theory of tonal music*, The MIT Press, Cambridge, MA (1983).

[8] Matoba, R., Sudo, H. and Tojo, S.: Evaluation of the Symmetry Bias in Grammar Acquisition, *18th International Symposium on Artificial Life and Robotics* (2013).

[9] Nakamura, M., Matoba, R. and Tojo, S.: Simulation of Emergence of Local Common Languages Using Iterated Learning Model on Social Networks, *International Journal On Advances in Intelligent Systems* (Sehring, H.-W., ed.), IARIA, pp. 374–384 (2015).

[10] Ravnani, A., Thompson, B., Grossi, T., Delgado, T. and Kirby, S.: Evolving building blocks of rhythm: How human cognition creates music via cultural transmission,

*bioRxiv*, (online), DOI: 10.1101/198390 (2017).

[11] Sakamoto, S., Arn, S., Matsubara, M. and Tojo, S.: Harmonic analysis based on Tonal Pitch Space, *2016 Eighth International Conference on Knowledge and Systems Engineering, KSE 2016, Hanoi, Vietnam, October 6-8, 2016*, pp. 230–233 (online), DOI: 10.1109/KSE.2016.7758058 (2016).

[12] Sudo, H., Matoba, R., Cooper, T. and Tsukada, A.: Effect of symmetry bias on linguistic evolution, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 21, No. 2, pp. 207–214 (online), DOI: 10.1007/s10015-016-0276-7 (2016).

[13] Suzuki, T. N., Wheatcroft, D. and Griesser, M.: Experimental evidence for compositional syntax in bird calls, *Nature Communications*, Vol. 7, p. 10986 (online), DOI: 10.1038/ncomms10986 (2016). Article.

[14] Verhoef, T.: The origins of duality of patterning in artificial whistled languages, *Lang Cogn*, Vol. 4, No. 4, pp. 357–380 (online), DOI: 10.1515/langcog-2012-0019 (2012). 23637710[pmid].

[15] Wallin, N. L., Merker, B. and Brown, S.(eds.): *The Origins of Music*, The MIT Press (2000).

[16] 香田啓貴：霊長類の音声コミュニケーションの研究はヒトの言語進化の理解にこれからも貢献できるのか？、*霊長類研究*, Vol. 30, No. 1, pp. 121–136 (オンライン), DOI: 10.2354/psj.30.012 (2014).

[17] 橋本 敬：言語進化とはどのような問題か？～構成論的な立場から、第 18 回日本人工知能学会論文集 (2004).

[18] 橋本 敬, 中塚雅也：文法化の構成的モデル化—進化言語学からの考察—, *認知言語学会論文集*, Vol. 7, 日本認知言語学会, pp. 33–43 (2007).

[19] 藤田耕司, 岡ノ谷一夫 (編)：進化言語学の構築 新しい人間科学を目指して, 株式会社ひつじ書房 (2012).

[20] 横井史也, 平田圭二, 竹川佳成：ルール処理と HMM を統合した和音認識器の実現, *人工知能学会全国大会論文集*, Vol. 29, pp. 1–4 (2015).

[21] 清水祐輔, 沼尾雅之：楽譜記述言語 MusicXML の拡張による楽典を考慮した和声解析フレームワークの提案, *技術報告 22* (2017).

[22] 吉井和佳, 後藤真孝：和音進行解析のための語彙フリー無限グラムモデル, *研究報告音楽情報科学 (MUS)*, Vol. 2011, No. 2, pp. 1–10 (2011).

[23] 須藤洗基, 橋本 敬, 東条 敏：“ベイジアン繰り返し学習モデルにおける対称性バイアスが及ぼす言語進化への影響”, *計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会講演論文集 (CD-ROM)* (2016). GS13-1.