

## 相互引き込みモデルに着目した音楽的周期性の創発に関する研究

相澤祐一\* 布袋田由理子\*\* 竹中毅\*\*\* 上田完次\*\*\*

\*東京大学大学院工学系研究科 \*\*東京大学大学院新領域創成科学研究科

\*\*\*東京大学人工物工学研究センター

本研究は、既存曲の譜面に観察されるような音楽的周期性がどのようにして実現されているのかを明らかにすることを目的とする。そのために、引き込みという人間の身体的特性によって暗黙的に音楽的周期性が創発しているという仮説を立て、楽曲生成のモデルを提案する。提案モデルでは、非線形振動子としての性質を持ったエージェント間の相互引き込みにより、発音のタイミングと音高遷移のタイミングが決定される。生成実験の結果、発音タイミングと音高遷移タイミングの統合的決定によって既存曲に見られるような音楽的周期を実現していることや、聴取実験の結果、生成条件によって異なる印象を持ったことが分かった。

### Study on emergence of musical periodicities considering a mutual entrainment model

Yuichi Aizawa\* Yuriko Hoteida\*\* Takeshi Takenaka\*\*\* Kanji Ueda\*\*\*

\*School of Engineering, The University of Tokyo \*\*Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

\*\*\*Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), The University of Tokyo

In this paper, we aim at understanding how musical periodicities as observed in existing music scores emerge. For the purpose, we hypothesize that musical periodicities implicitly emerge based on entrainment as human physical features, and propose a music production model in which agents as nonlinear oscillators decide the timing of note onset and pitch transition through mutual entrainment. The result shows that the integrative decision of the timing of note onset and pitch transition realizes musical periodicities as observed in existing music scores and the participants of psychological experiment felt different impressions according to the production methods.

#### 1. はじめに

楽曲形式によるトップダウンな制約だけでなく、西洋音楽の譜面を見ると、音高の上昇・下降の変化が規則的に出現している点や、同様のフレーズが繰り返されるといった点など、音高や音長の時間的変化に関して大小様々な周期が観察できる。このような特徴に対し、譜面情報の解析による拍、小節やフレーズといった周期の抽出に関してはこれまでにいくつかの研究がなされてきた[1-3]。一方、譜面上で観察される周期性以外にも、演奏における拍節のゆらぎや、演奏情報を聴取する際における拍節の認知という2つのレベルの音楽的周期性に関する議論がなされてきた。たとえば演奏における拍節のゆらぎに関する研究として、三宅ら[4]は、より人間らしい演奏を行うアンサンブルシステムの構築に際して相互引き込みモデルを適用している。また McGuinness[5]は、演奏時のグルーヴの持つ微小時間におけるゆらぎに着目し、ゆらぎが生成される過程を説明する理論の提案を行っている。

また、聴取時における拍節の認知に関する研究として、Largeら[6][7]は、ホップ振動子群の相互引き込みによる知覚数理モデルを提案し、テンポのゆらぎを追跡する被験者実験の結果を模していることを示した。

しかしながら、譜面に観察されるような音楽的周期性がそもそもどのようにして実現しているのかという問題は未だ明らかになっていない。作曲は、個々の音の関係を考慮しながら、全体の構造的秩序を同時に設計するという音符の複雑な配置決定問題であるが、人間は多くの暗黙的な過程を通して解決してきたためと考えられる。この暗黙的な設計問題に対して、我々は音楽（譜面情報）を、人間の時間的な特性に基づいて自己組織的に生成されるという創発現象として捉えるアプローチをとってきた。これまでも、認知的特性に基づいた評価指標によって、楽音としてのエージェントが相互作用を通して、和音列生成や旋律生成などを行うといった創発的作曲モデルを提案し、実験的に検証してきた[8][9]。

そこで本研究は、引き込みという人間の身体的な特性が、音楽の演奏や聴取だけでなく、楽曲の生成にも関わっており、局所的な相互作用を通して、既存曲に観察されるような音楽的周期性が創発するという仮説を立て、検証を行った。第2章では、音楽的周期性を観察するための時系列解析と結果について示す。第3章で、その解析結果と相互引き込み理論に基づいたエージェントベースの創発的楽曲生成モデルを提案し、第4章において、楽曲生成実験、第5章において、聴取実験の結果を示し、第6章で本論文の結論と今後の展望について述べる。

## 2. 時系列の抽出と周期性解析

Rosenthal[1] は発音タイミングに着目して、発音時を1、その他の時間ステップを0というように譜面情報をバイナリー表現し、自ら開発したプログラム“Ta”によって、拍節の階層構造を特定した。Brown[2]は、バイナリー表現を用いなかったが、一声部のIOIの時系列データの自己相関解析によって拍子や小節の特定が可能であることを示した。我々は、RosenthalやBrownらが着目した発音タイミング以外にも、以下の(ii)(iii)のようなタイミング情報に着目し、いくつかの既存曲に対して、様々な時系列解析を行ってきた。

- (i) 発音時を1、その他、休符や伸ばしている間を0 (発音タイミング時系列)
- (ii) 音高上昇時を1、維持される時を0、下降時を-1 (音高遷移方向時系列)
- (iii) 音高遷移時を1、それ以外の時を0 (音高遷移タイミング時系列)

ここではA.Vivaldi作曲の「調和の靈感」(4/4拍子、最小時間単位16分音符)を対象とした時系列解析の結果の概要を示す。まず、(i)~(iii)の時系列に関して、声部ごとに自己相関解析を行った。また我々は、抽出した時系列から楽曲全体の周期性を観察できるかどうかを調べるため、(i)~(iii)の時系列に対して、声部間の相互相関解析を行った。ただし3声部からなる楽曲については、第1声部-第2声部間、第2声部-第3声部間、第3声部-第1声部間の3つの相互相関係数を平均化した。

### (i) 発音タイミング時系列の解析

相互相関解析については、4分音符、2分音符、小節など4の倍数の時間に相当するラグで正の相関が観察された。ここから、楽曲全体の音楽的周期性を発音タイミングという側面から特定できることが分かった。

### (ii) 音高遷移方向時系列の解析

音高遷移方向時系列に対して相関解析を行った結果、声部ごとの周期の特定と声部間の関連性の確認はできなかった。このことから音楽的周期性を音高遷移方向という側面から特定できないことが示唆された。

### (iii) 音高遷移タイミング時系列の解析

音高遷移タイミング時系列に対して相関解析を行ったところ、自己相関解析の結果、相互相関解析の結果ともに4の倍数に相当するラグで正の相関が確認された。このことから、声部ごと、また楽曲全体の音楽的周期性を音高遷移タイミングという側面から観察できることが分かった。

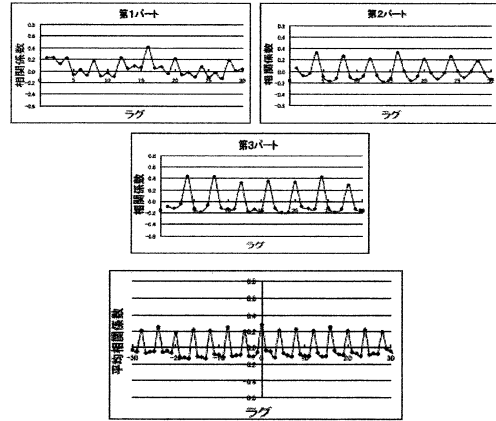


図1. 音高遷移タイミング時系列の自己相関解析結果(上・中)と相互相関解析結果(下)

これらの傾向は他の楽曲に関しても同様な結果が観察された。以上から、発音タイミングに加えて、音高遷移タイミングという側面からも音楽的周期性を観察、特定できることが示唆された。ただし、発音タイミングと音高遷移タイミングは互いに独立の関係にあるのではなく、音高遷移が起こる時間ステップは必ず発音も伴う。実際に我々は、相互相関解析の結果から、2つのタイミング時系列に周期的に正の相関があることも確認した。そこで、発音タイミングと音高遷移タイミングに関する周期的特性を基に、相互引き込み理論を用いた楽曲生成モデルの構築を次章において試みる。

## 3. 引き込み理論を用いた楽曲生成モデル

発音タイミング・音高遷移タイミングに関していずれの声部についても正の自己相関があったことから、各声部内に非線形振動子としての性質を持った、発音タイミングを決定する「発音決定エージェント」と音高遷移タイミングを決定する「音高遷移決定エージェント」を設定した。これらのエージェントは、相互に結合しており、各エージェントの固有振動数が引き込み現象を通じて変化する。声部数は3とし、声部ごとに発音決定エージェントを3つ、音高遷移決定エージェントを3つとした。

具体的にエージェント間には、周期性解析における(a)~(d)の結果に照らして、(1)~(4)のように結合を持たせた。

### 既存曲に見られる相関

- (a) 声部ごとの発音タイミング時系列に関する正の自己相関
- (b) 発音タイミング時系列間に関する正の相互相関

- (c) 声部ごとの音高遷移タイミング時系列に関する正の自己相関  
 (d) 同一声部における音高遷移タイミング時系列と発音タイミング時系列の正の相互相関

エージェント間の結合

- (1) 同一声部内における発音決定エージェント間の結合 ( $inK$ )  
 (2) 他声部の発音決定エージェントとの結合 ( $exK$ )  
 (3) 同一声部内における音高遷移決定エージェント間の結合 ( $inL$ )  
 (4) 同一声部内における音高遷移決定エージェントと発音決定エージェントの結合 ( $exL$ )

これらのエージェントは、相互作用を及ぼしあいながら(図2(A)), 各々  $\pi/2$  や  $3\pi/2$  といった位相を直近の過去として持つ時間ステップにおいて1 (発音あるいは音高遷移有り), 他の時間ステップにおいて0と出力し, 声部ごとに時系列を生成する。ただし, 音高遷移は必ず発音時に起こることから, 発音タイミング以外の時間ステップにおける音高遷移は反映されない(図2(B)).

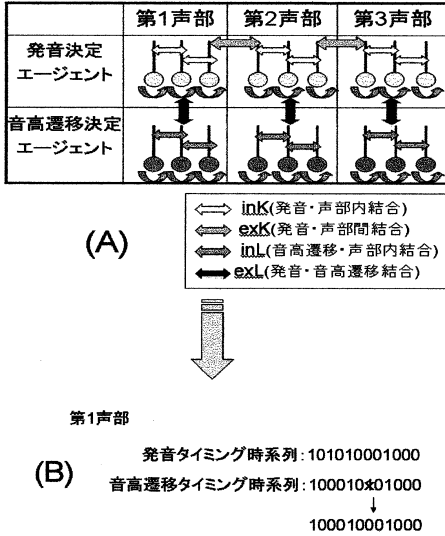


図2. モデルの構成

以下に示すように, エージェントは, 蔵本モデル(1975)を基本とする相互引き込み理論に従って, 相互作用をする。

発音決定エージェント

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + inK \sum \sin(\theta_j - \theta_i) + exK \sum \sin(\theta_n - \theta_i) + exL \sum \sin(\varphi_j - \theta_i) \dots (1)$$

音高遷移決定エージェント

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = \psi_i + inL \sum \sin(\varphi_j - \varphi_i) + exL \sum \sin(\theta_j - \varphi_i) \dots (2)$$

ただし,  $\theta_i$  は  $i$  番目の発音決定エージェントの位相を,  $\varphi_i$  は  $i$  番目の音高遷移決定エージェントの位相をさす。また  $\omega_i = \omega_0 + \delta\omega_i$ ,  $\psi_i = \psi_0 + \delta\psi_i$  として, それぞれ  $i$  番目の発音決定エージェントの固有振動数,  $i$  番目の音高遷移決定エージェントの固有振動数とする。

(1)式の右辺の第2項は同一声部内の発音決定エージェントとの相互作用を, 第3項は他声部の発音決定エージェントとの相互作用を, 第4項は同一声部内の音高遷移決定エージェントと発音決定エージェントとの相互作用を表す項である。

(2)式の右辺の第2項は同一声部内における音高遷移決定エージェント間の相互作用を, 第3項は同一声部内における発音決定エージェントとの相互作用を表す項である。

ここで, 1個の発音決定エージェントに対して, 他声部の発音決定エージェントは6個, 同一声部の発音決定エージェントは2個, 同一声部の音高遷移決定エージェントは3個結合していることから,  $exK$  と  $exL$  の規模を  $inK$  のそれに揃えた。また音高遷移決定エージェントが結合できる同一声部の音高遷移決定エージェントは2個であることから  $inL$  の規模は  $inK$  のそれと同等であるので特に調整をしなかった。

4. 計算機による楽曲生成実験

4.1 実験条件

前章のモデルによる楽曲生成実験を行った。ここで, 各パラメータは表1のように設定した。

表1. パラメータの設定

最小時間単位	$dt$	16分音符に相当する時間
発音決定エージェントの固有振動数の中心値	$\omega_0$	$2\pi/8dt$
音高遷移決定エージェントの固有振動数の中心値	$\psi_0$	$2\pi/8dt$
同一声部内発音決定エージェント間の結合係数	$inK$	$\omega_0$ に対し, 0%,1%,3%
他声部の発音決定エージェントとの結合係数	$exK$	$\omega_0$ に対し, 0%,1%,3%
同一声部内音高遷移決定エージェント間の結合係数	$inL$	$\psi_0$ に対し, 1%
同一声部内発音決定エージェント・音高遷移決定エージェント間の結合係数	$exL$	$\psi_0$ に対し, 1%
使用音		C4~C6 中のへ調長音階の中からランダムに選択
開始音		F4, A4, C5

ただし, 各エージェントの初期の固有振動数は,  $\omega_0, \psi_0$  を中心値として-1~1の間の乱数を付加したものとし, 初期位相はランダムに与えた。ここで既存曲の解析結果から, 音高遷移タイミングと発音タイミングに相関が見られたこと, 「十分に近い振動数を

持つ振動子間において引き込みが起ころ」という物理学的知見を考慮して、 $\omega_0 = \psi_0$  とする。

実験は以下のように、条件を大きく3つに分けた。

実験1: *inL* 非導入 *exL* 非導入

実験2: *inL* 非導入 *exL* 導入

実験3: *inL* 導入 *exL* 導入

各実験共通に、*inK* と *exK* の組合せ全9通りについて行った。他のパラメータは、表1にあるように固定した。

## 4.2 実験1：発音決定の統合のみによる楽曲生成実験

### 4.2.1 実験の設定

この実験では同一声部の発音決定エージェント間(*inK*)、他声部の発音決定エージェントとの間(*exK*)にのみ結合が存在する。音高遷移決定エージェントは各自の固有振動数のみに従って、音高遷移タイミングを決定することとなる。

### 4.2.2 結果と考察

生成された各声部における発音タイミング・音高遷移タイミングの[1, 0]時系列に対して声部間の相互相関解析を行った結果を示す。ただし、生成曲の譜面は4/4拍子で表示されるように設定した。

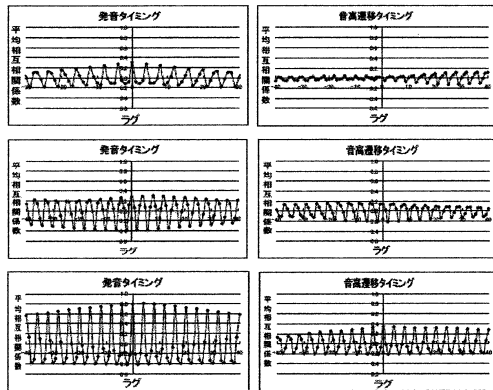


図3. 生成曲の相互相関解析結果 (上)*inK*=*exK*=0% (中)*inK*=*exK*=1% (下) *inK*=*exK*=3%



図4. 生成された楽曲の一部(*inK*=*exK*=1%)

発音タイミング時系列の声部間の相互相関について、結合係数が高まるほど相関も強まっていることが分かった。しかし、*inL* や *exL* が導入されていないにも関わらず *inK*=3%、*exK*=3% において音高遷移タイミング時系列に関して声部間の相互相関が認

められた。これは発音の際に配置される音の選択肢が15通り(C4~C6のへ調長音階)であり、音高遷移する確率が非常に高くなるため、*inK* や *exK* が高まったことで音高遷移のタイミングも周期性を持つようになったと考えられる。

## 4.3 実験2：同一声部内における音高遷移決定の統合による楽曲生成

### 4.3.1 実験条件

実験1の結合に加え、*inL* を  $\psi_0$  に対し、大きさを1%として導入し、発音決定エージェント間と、同一声部の音高遷移決定エージェント間に結合を持たせる。

### 4.3.2 結果と考察

生成された各声部における発音タイミング・音高遷移タイミングの[1, 0]時系列に対して声部間の相互相関解析を行った結果を示す。

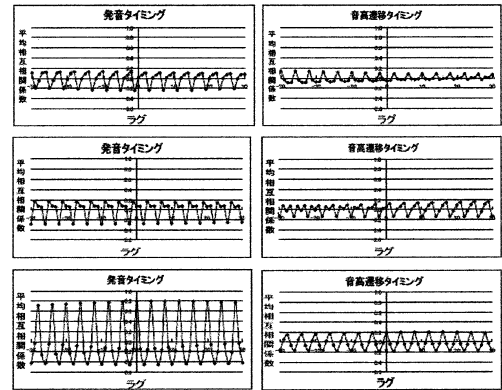


図5. 生成曲の相互相関解析結果 (上)*inK*=*exK*=0% (中)*inK*=*exK*=1% (下) *inK*=*exK*=3%



図6. 生成された楽曲の一部(*inK*=*exK*=1%)

図5のように、発音タイミング時系列の声部間の相互相関は、実験1と類似した結果が認められた。しかし *inK*=3%、*exK*=3% の条件下では音高遷移タイミング時系列の声部間の相関が実験1の結果と比較して、低くなっていることが観察された。これは音高遷移決定エージェントの位相が揃った結果、遷移の機会が減少し、音高遷移タイミングの周期性が実現されにくくなったと考えられる。図6からも同じ音高を出力し続ける声部があることが分かる。

## 4.4 実験3：同一声部内における発音決定と音高遷移決定の統合による楽曲生成

#### 4.4.1 実験の設定

実験 2 の結合に加え、 $exL$  を  $\psi_0$  の大きさに対し 1% として導入し、同一声部内の発音決定エージェントと音高遷移決定エージェントの間にも結合を持たせる。

#### 4.4.2 結果と考察

生成された各声部における発音タイミング・音高遷移タイミングの [1, 0] 時系列に対して声部間の相互相関解析を行った結果を示す。

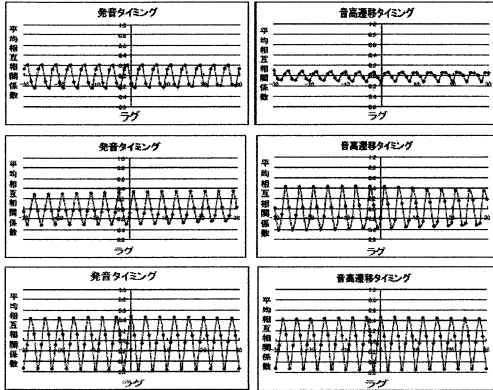


図 7. 生成曲の相互相関解析結果 (上)  $inK=exK=0\%$   
(中)  $inK=exK=1\%$  (下)  $inK=exK=3\%$



図 8. 生成された楽曲の一部 ( $inK=exK=1\%$ )

図 7 のように、発音タイミング時系列の声部間の相互相関解析の結果と、音高遷移タイミング時系列の声部間の相互相関解析の結果が類似していることが分かった。図 8 から、発音時にほとんど音高遷移を起こしていたことが観察された。ここで、発音が起こった間隔の平均値 (発音イベント間隔) を 1 として、音高遷移が起こった間隔の平均値 (音高遷移イベント間隔) の割合を算出すると、実験 3 の生成曲のイベント間隔比と既存曲におけるイベント間隔比が類似する結果となった。このことから、発音タイミングと音高遷移タイミングの統合的決定によって楽曲に見られるような周期性が実現していることが示唆された。

#### 5. 被験者による聴取実験

楽曲生成実験 1~3 の手法を用いて得られる生成曲が被験者にどのような印象を与えるか調べるために、聴取実験を行った。

##### 5.1 方法

表 2 に示す 14 種の刺激を用意した。被験者 (18 名) に聴取させ、その印象について 16 の形容詞対を用いた SD 法による 5 段階

評価を行わせた。

表 2. 刺激デザイン

	結合	近接性の考慮	刺激略号
実験 1 発音決定の統合	弱め	○	1wp
		×	1w
	強め	○	1sp
実験 2 発音決定の統合 / 音高遷移決定の統合	弱め	○	2wp
		×	2w
	強め	○	2sp
実験 3 発音決定と音高遷移決定の統合	弱め	○	3wp
		×	3w
	強め	○	3sp
ランダム	—	○	rp
	—	×	r

ただし、この聴取実験において、近接性の考慮を加えたが、これは結合の強弱と近接性の交互作用がどのように印象に影響を与えるかを調べるためである。また近接性を考慮した楽曲は、現時点の音高から遷移する際に、近傍の音高がランダムに与えられるようにして生成した。そのため、発音決定エージェントや音高遷移決定エージェントの意思決定ルールに変更はない。ランダム条件では、発音タイミングと音高遷移タイミングに関して、16 分音符、付点 8 分音符、8 分音符、4 分音符に相当する時間の中からランダムに声部ごとに割り振られた。

#### 5.2 結果と考察

集計したデータから、各刺激の各評価項目における評価について、全被験者の評価値平均をとり、各刺激の各評価項目の評価値とした。ここで、平均が 3 に近く分散も小さい 3 つの評価項目を取り除いて生成条件ごとに分類したものを図 9 に示す。

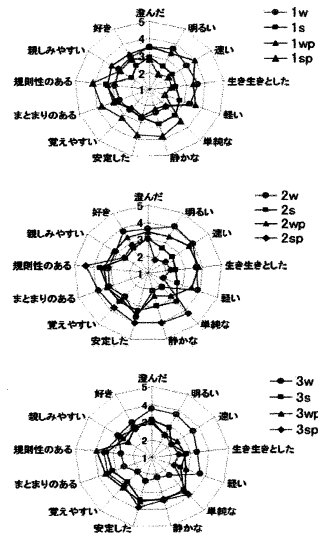


図 9. 各刺激の評価値

図9から、「明るさ」「速さ」といった評価項目に関して、結合の強弱による印象の違いが観察された。一方、「まとまりのある」「安定した」といった評価項目に関しては、1s-1wp, 2s-2wp, 3s-3wp のいずれも差異が認められなかった。ここから、近接性と結合の強さのどちらも「安定した」印象を与えていると考えられる。

さらに刺激ごとの評価値を用いて因子分析を行った。主因子法、値の変換に直交・バリマックス回転を用いて、3つの因子を抽出した。第1因子は、「覚えやすい・まとまりのある・安定した」(安定性)、第2因子は、「軽い・速い・生き生きとした」(活性)、第3因子は、「親しみやすい・好き・澄んだ」(親近性)であり、これらを軸として各刺激をマッピングした結果を図10に示す。

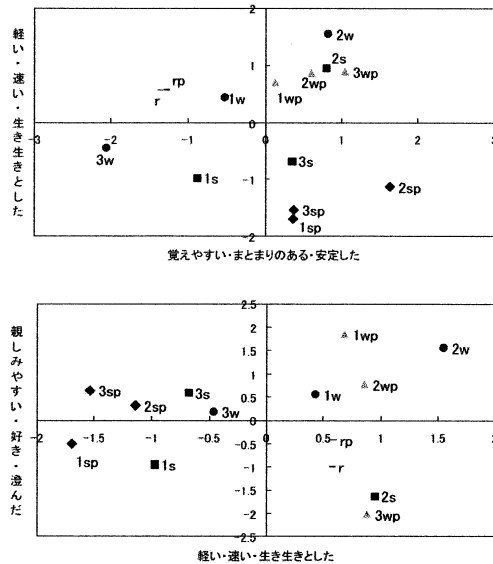


図10. 各刺激のマッピング

図10(上)からランダム条件の刺激とモデルによる刺激が異なる印象を与えていることが示唆された。また、実験3による刺激群は安定性の評価を受けているが、活性を表す語の軸に関して負の評価を受けていることが観察された。実験2の刺激群は、安定性の軸に関して正の評価を受けている一方で、図10(下)にあるように、活性の軸に関して、他の実験の刺激群より高い評価を受けていることが分かった。これは、4.3節で述べたように、同一の音を出力し続ける声部が存在するため、安定性の評価が高く、また結合が実験3の刺激に比べて弱いために活性の評価も得ているものと思われる。

## 6. 結論と今後の展望

本研究は、音楽的周期性に関して、発音タイミングと音高遷移タイミングに着目し、それらを決定するエージェントが相互引き込み理論に基づいた相互作用を通して、楽曲生成を行うモデルを提案し、楽曲生成実験と生成曲の聴取実験を行った。

結果、発音タイミングと音高遷移タイミングの統合的決定によって音楽的周期性が創発していること、結合の強弱によって生成曲の印象が変化することが分かった。特に、2つのタイミングを統合的に決定するモデルによる生成曲に対して、被験者が安定性と不活性の印象を持ったこと、独立的に決定するモデルによる生成曲に対しては、安定性と活性の印象を持ったことが示された。

今後は、譜面情報に含まれていると考えられるフレーズなどの長周期などについても考慮していきたい。たとえば、Setharesら[3]は、Rosenthalと同様に、発音タイミングに着目して、バイナリー表現した譜面情報に対してフーリエ解析を行っている。ここでSetharesは、フーリエ解析において、フレーズなどの長周期に相当するスペクトルに対する解釈が困難であることを指摘し、基底となる周期を探索するアルゴリズム“Periodicity Transforms”を提案し、Rosenthalの解析結果と同様の結果になることを確認している。

また、本稿で着目したタイミング情報以外にも、和声進行を考慮した音楽的周期性の観察や解析も可能であると思われる。その結果に基づいて、一般的な12音階にまで拡大し、協和とリズムの相互作用を考慮した楽曲生成モデルを構築することが期待される。

## 参考文献

- [1] Rosenthal, D.: Emulation of Human Rhythm Perception, *Computer Music Journal*, Vol.16, No.1, (1992)
- [2] Brown, J.C.: Determination of the meter of musical scores by autocorrelation, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol.94, No.4, pp.1953-1957, (1993)
- [3] Sethares, W.A. and Staley T.W.: Periodicity Transforms, *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, Vol.47, No.11, pp.2953-2964, (1999)
- [4] 小林洋平, 三宅美博: 階層化された相互引き込みモデルを用いたアンサンブルシステム, 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.8, pp.702-711, (2005)
- [5] McGuinness, A.: Microtiming deviations in groove, Thesis submitted for the degree of Master of Electronic Arts by Research of Australian National University, (2005)
- [6] Large, E.W.: Periodicity, Pattern Formation, and Metric Structure, *Journal of New Music Research*, Vol.30, No.2, pp.173-185, (2001)
- [7] Large, E.W. and Palmer, C.: Perceiving temporal regularity in music, *Cognitive Science*, Vol.26, No.1, (2002)
- [8] 竹中毅, 鈴木晋太郎, 布袋田由理子, 上田次次: マルチ・エージェント学習モデルを用いた音楽的構造の創発, 情報処理学会研究報告 2006-MUS-65, Vol.2006, No.45, pp.1-5(2006).
- [9] Hoteida, Y., Suzuki, S., Takenaka, T., Ueda, K.: Agent-based melody generation model according to cognitive and bodily features: Toward composition of Japanese traditional pentatonic music, *Proceedings of 9th International Conference on Music Perception and Cognition (ICMPC9)*, pp. 235-238, (2006).