

# 発光変化パターンのカオス性と周期性が アニメシー知覚に与える影響

稲葉 泰貴<sup>1,a)</sup> 寺田 和憲<sup>1,b)</sup> 深井 英和<sup>1,c)</sup>

**概要:** 人はホタルの点滅からはアニメシーを感じるが明滅する信号機からはアニメシーを感じない。本研究では、発光変化のどのような性質がアニメシー知覚に影響を与えるかを調べるために、カオス性、周期性、カテゴリ知識の3要因を独立変数としたアニメシー知覚実験を行った。実験によって、周期性が高いカオス方程式では、カオス性の高さに応じてアニメシーの評定値が高くなったが、周期性の低いカオス方程式では、評定値の向上は確認されなかった。また、アニメシー知覚には発光体についてのカテゴリ知識が影響することが確認された。

**キーワード:** アニメシー, カオス, 周期性, 発光変化, カテゴリ知識

## 1. はじめに

私たちの観測する世界には、炎のゆらぎや、浜辺に打ち寄せる波の間隔、時計の振り子など、多くの時系列変化が存在している。私たち人には、これらの時系列変化から無意識にアニメシーを感じる能力が備わっている。例えば、規則的な運動を行う時計の針やメトロノームからは、機械としての美しさは感じていてもアニメシーは感じるができない。一方で、ろうそくの炎ゆらぎやホタルの光の点滅からはアニメシーを感じ、独特の風情や癒しを感じることもある。

これらのアニメシー知覚には中程度の予測可能性が必要とされており、その指標としてはカオス性や周期性が挙げられる。しかし、人のアニメシー知覚にカオス性と周期性のどちらが寄与しているかは、未だ解明されていない。また、観測対象のカテゴリ知識が人のアニメシー知覚に与える影響も判明していない。これらの要因が人のアニメシー知覚に与える影響を解明することは、より自然な動きをするロボットの開発やロボットと人の自然な対話の実現につながる。

そこで、本研究では、カオス性要因、周期性要因、カテゴリ知識要因の組み合わせが異なる発光変化パターンを使用したアニメシー知覚実験を行うことで、時系列変化に対する人のアニメシー知覚にカオス性、周期性、対象のカテ

ゴリ知識がどのように寄与しているか検証する。

時系列変化の周期性とアニメシー知覚の関係については、自然界の多くの現象が1/fゆらぎと呼ばれる周期性を示すことが知られている。例えば、自然界におけるホタルの点滅パターンも1/fゆらぎであることが確認されている [1]。ロボットの動作においても、人の働きかけに対するロボットの反応パターンに1/fゆらぎを用いた場合に、アニメシー知覚の向上が確認されている [2]。そのため、時系列変化に対する人のアニメシー知覚には、時系列変化の周期性が寄与していると考えられる。一方で、カオス性と生命は深くかかわっており、生命の進化は完全にランダムに行われてきたものではなく、「生命の進化はカオスと秩序の間の境界線上で自己組織化の法則が作用することで行われた」と考えられている [3]。このことから、時系列変化に対する人のアニメシー知覚に時系列変化のカオス性が寄与している可能性がある。しかし、経時発展性は知覚することが困難なため、時系列変化に対する人のアニメシー知覚には、時系列変化のカオス性よりも周期性の方が寄与していると考えられる。カテゴリ知識とアニメシー知覚の関係については、アニメシー知覚の脳内基盤を検討した福田らの研究があり、人が生物(カメ)と非生物(ロボット)に働きかける場合に、アニメシー知覚に関わるとされる脳の左前頭下部の活動に違いが見られるとした [4]。このことから、生物、非生物といったカテゴリ知識の違いは、人のアニメシー知覚に影響を与えていると考えられる。

以上のことから、「時系列変化に対する人のアニメシー知覚には、時系列変化のカオス性よりも周期性の方が寄与し

<sup>1</sup> 岐阜大学

<sup>a)</sup> inatai@elf.info.gifu-u.ac.jp

<sup>b)</sup> terada@gifu-u.ac.jp

<sup>c)</sup> fukai@gifu-u.ac.jp

ている」, 「人のアニメシー知覚には観測対象のカテゴリ知識が寄与しており, 同じ時系列変化であっても, 対象のカテゴリ知識の違いによって得られる印象に差が生じる」という2つの仮説が導かれる。これらの仮説に対する発光変化パターンアニメシー知覚実験結果に関して, 「人のアニメシー知覚にカオス性が関わっているならば, 発光変化パターンのカオス性要因の違いによってアニメシー知覚に差が生じる」というカオス性についての予測が立てられる。一方, 周期性については, 「人のアニメシー知覚に周期性が関わっているならば, 発光変化パターンの周期性要因の違いによってアニメシー知覚に差が生じる」という予測が立てられる。カテゴリ知識については, 「人のアニメシー知覚に観測対象のカテゴリ知識が関わっているならば, 発光物体のカテゴリ知識の違いによって, 発光変化パターンから得られる印象に差が生じる」という予測が立てられる。

発光変化パターンアニメシー知覚実験では, カオス性要因の水準に時間発展性の高低, 周期性要因の水準に周期性の有無, カテゴリ知識要因の水準に発光物体の画像(生物, 自然物, 機械)を用いて3要因(2×2×3水準)の分散分析を行い, 各要因の主効果と交互作用の有無から仮説の検証を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験参加者

18歳から24歳( $M=20.29$ ,  $SD=1.72$ )の男性16人, 女性12人の計28人で参加者内実験を行った。実験参加者には, 1000円分の図書カードで報酬が支払われることを教示した。

### 2.2 実験装置

実験はすべてPCのディスプレイに表示されるウェブブラウザ上で行った。ウェブブラウザはGoogle Chromeを使用し, 実験操作はキーボードとマウスで行った。

### 2.3 実験材料

本実験では, 画像の輝度に変化する1分程度の動画を使用した。動画は周期性要因2種類(周期性あり, 周期性なし)×カオス性要因2種類(カオス性低, カオス性高)×カテゴリ知識要因3種類(カテゴリ知識が異なる画像(ホタルイカ, 炭火, 電源ランプ))の3要因12パターンの発光変化パターン動画を作成した。

発光変化の時系列変化には, 周期性の異なる2種類のカオス方程式(周期性あり:ロジスティック写像, 周期性なし:間欠カオス法)から生成された状態値変化を用いた。ロジスティック写像は周期性が高く, 間欠カオス法は周期性が低いことが自己相関分析により確認されている(付録図1(a), 図1(b), 図2(a), 図2(b))。

ロジスティック写像の方程式は次式で表される:

$$L(t+1) = aL(t)(1-L(t)), \quad 0 \leq a \leq 4 \quad (1)$$

また, 間欠カオス法の方程式は次式で表される:

$$K(t+1) = \begin{cases} K(t) + 2(K(t))^2, & K(t) < 0.5 \\ K(t) - 2(1-K(t))^2, & K(t) \geq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

これらのカオス方程式から生成された時系列変化のカオス性の強度を表す指標としてリアプノフ指数を用いた(式(3))。リアプノフ指数が負の値の場合, システムはカオス性を示さない。リアプノフ指数が正の値の場合, システムはカオス性を示し, リアプノフ指数が大きいほどカオス性が高くなる。動画には, 各モデルごとにカオス性の低い時系列変化(リアプノフ指数0.1)とカオス性の高い時系列変化(リアプノフ指数0.5)を使用した。

$$\lambda = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\log |f'(x(t))|). \quad (3)$$

発光変化をなめらかに行うため, 動画作成前に時系列データにはスプライン補間を行った。さらに, ロジスティック写像の点滅速度は間欠カオス法の点滅速度の約5倍であったため, ロジスティック写像の時間スケールを間欠カオス法の時間スケールの1/5に設定した。時系列データはOpenCVで0.00から1.00の輝度値データとして読み込み, 連番画像に変換した。動画はffmpegによって連番画像から30fpsで作成した。

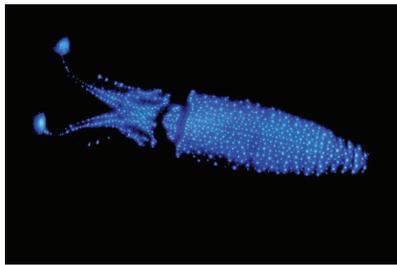
また, カテゴリ知識が異なる画像として, 生物のカテゴリからホタルイカの画像, 自然現象のカテゴリから炭火の画像, 機械のカテゴリから電源ランプの画像を採用した(図1(a), 図1(b), 図1(c))。画像ごとに発光変化が不自然にならないように動画の再生速度を調整した結果, ホタルイカの動画を基準として, 炭火は1.5倍, 電源ランプは0.5倍の再生速度に調整された。

### 2.4 測定方法

12パターンの発光変化の動画に対してどのような印象を持ったかを各動画ごとにWebアンケートによって測定した。動画が表示される順番は実験参加者ごとにランダムに決められる。アンケートは7段階のリッカート尺度を用いた。評価が7に近づくほど強い同意を示し, 1に近づくほど強い不同意を示す。アンケートは表1の通りである。

### 2.5 実験手順

実験参加者には短い動画を視聴してアンケートに答える実験であると説明した。その後, 動画は12パターン存在



(a) 生物カテゴリ：ホタルイカ



(b) 自然物カテゴリ：炭火



(c) 機械カテゴリ：電源ランプ

図 1 使用した画像

表 1 実験アンケート

質問番号	質問内容
1	変化の周期性を認識することができる
2	機械的な変化である
3	生物的な変化である
4	複雑な変化である
5	ランダムな変化である
6	自然な変化である
7	予測することが難しい変化である
8	生き生きとした変化である
9	作為性を感じる変化である
10	明るさの変化は画像中の対象物の発光変化としてふさわしい

し、各動画を最低 60 秒間視聴してからアンケートに回答してもらう事など、一連の実験の流れを説明してから実験を開始した。

## 2.6 解析手法

28 人分のアンケート結果を周期性要因 2 種類 (周期性あり, 周期性なし) × カオス性要因 2 種類 (カオス性低, カオス性高) × カテゴリ知識要因 3 種類 (カテゴリ知識が異なる画像 (ホタルイカ, 炭火, 電源ランプ)) の 3 要因で分散分析を行った。また, “明るさの変化は画像中の対象物の発光変化としてふさわしい” の質問に対してのみ, 画像別に周期性要因 2 種類 (周期性あり, 周期性なし) × カオス性要因 2 種類 (カオス性低, カオス性高) の 2 要因で分散分析を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 変化の周期性を認識することができる

周期性要因の周期性あり水準は周期性なし水準と比較して評定値が有意に高いことが確認された ( $F(1,324) = 112.51, p < .01$ )。また, 周期性要因 × カオス性要因の交互作用が有意に存在した ( $F(1,324) = 27.94, p < .01$ , 図 2)。

さらに, カオス性要因による単純主効果が周期性あり水準において有意に確認され, カオス性の上昇による周期性の認識の低下が見られた ( $F(1,324) = 58.18, p < .01$ )。

### 3.2 機械的な変化である

画像カテゴリの違いによる評定値の差が有意に確認された ( $F(2,324) = 3.66, p < .05$ )。評定値は, 電源ランプ (平均 4.26), 炭火 (平均 4.04), ホタルイカ (平均 3.72) の順に高く, 電源ランプはホタルイカと比較して評定値が有意に高いことが確認された ( $p < .01$ , 図 4(a))。

### 3.3 生物的な変化である

周期性要因 × カオス性要因の交互作用が有意に存在した ( $F(1,324) = 3.76, p < .01$ , 図 3)。また, カオス性要因による単純主効果が周期性あり水準において有意に確認され, カオス性の上昇による生物性の評定値の向上が見られた ( $F(1,324) = 11.18, p < .01$ )。さらに, カテゴリ知識の違いによる評定値の差が有意に確認された ( $F(2,324) = 3.66, p < .05$ )。評定値は, ホタルイカ (平均 4.16), 炭火 (平均 3.42), 電源ランプ (3.04) の順に高く, ホタルイカは炭火, 電源ランプと比較して評定値が有意に高いことが確認された (ホタルイカ-炭火:  $p < .01$ , ホタルイカ-電源ランプ:  $p < .01$ , 図 4(b))。

### 3.4 複雑な変化である

周期性要因の周期性なし水準は周期性あり水準と比較して評定値が有意に高いことが確認された ( $F(1,324) = 105.39, p < .01$ )。また, 周期性要因 × カオス性要因の交互作用が有意に存在した ( $F(1,324) = 25.01, p < .01$ , 図 2(b))。さらに, カオス性要因による単純主効果が周期性あり水準において有意に確認され, カオス性の上昇による複雑性の認識の向上が見られた ( $F(1,324) = 47.80, p < .01$ )。

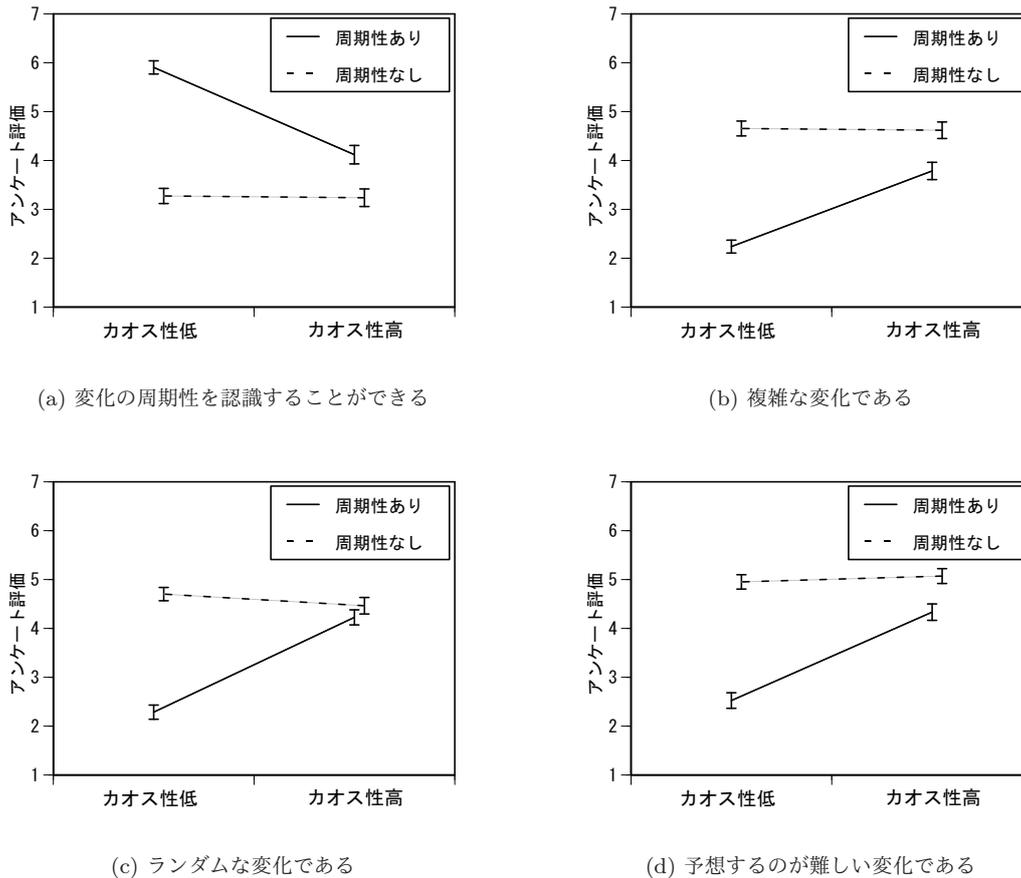


図 2 予測可能性に関する質問における周期性要因×カオス性要因の交互作用  
 エラーバーは標準誤差

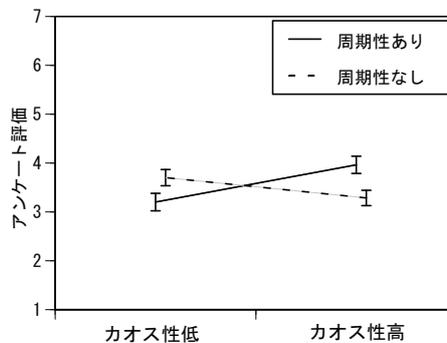


図 3 生物的な変化である：周期性要因×カオス性要因の交互作用 エラーバーは標準誤差

### 3.5 ランダムな変化である

周期性要因の周期性なし水準は周期性あり水準と比較して評定値が有意に高いことが確認された ( $F(1,324) = 76.55, p < .01$ ). また、周期性要因×カオス性要因の交互作用が有意に存在した ( $F(1,324) = 51.55, p < .01$ , 図 2(c)). さらに、カオス性要因による単純主効果が周期性あり水準において有意に確認され、カオス性の上昇によるランダム性の認識の向上が見られた ( $F(1,324) = 81.80, p < .01$ ).

### 3.6 自然な変化である

カテゴリ知識の違いによる評定値の差が有意に確認された ( $F(2,324) = 3.66, p < .05$ ). 評定値は、ホタルイカ (平均 4.01), 炭火 (平均 3.92), 電源ランプ (平均 3.38) の順に高く、電源ランプはホタルイカ、炭火と比較して評定値が有意に低いことが確認された (ホタルイカ-電源ランプ:  $p < .01$ , 炭火-電源ランプ:  $p < .01$ , 図 4(c)).

### 3.7 予測することが難しい変化である

周期性要因の周期性なし水準は周期性あり水準と比較

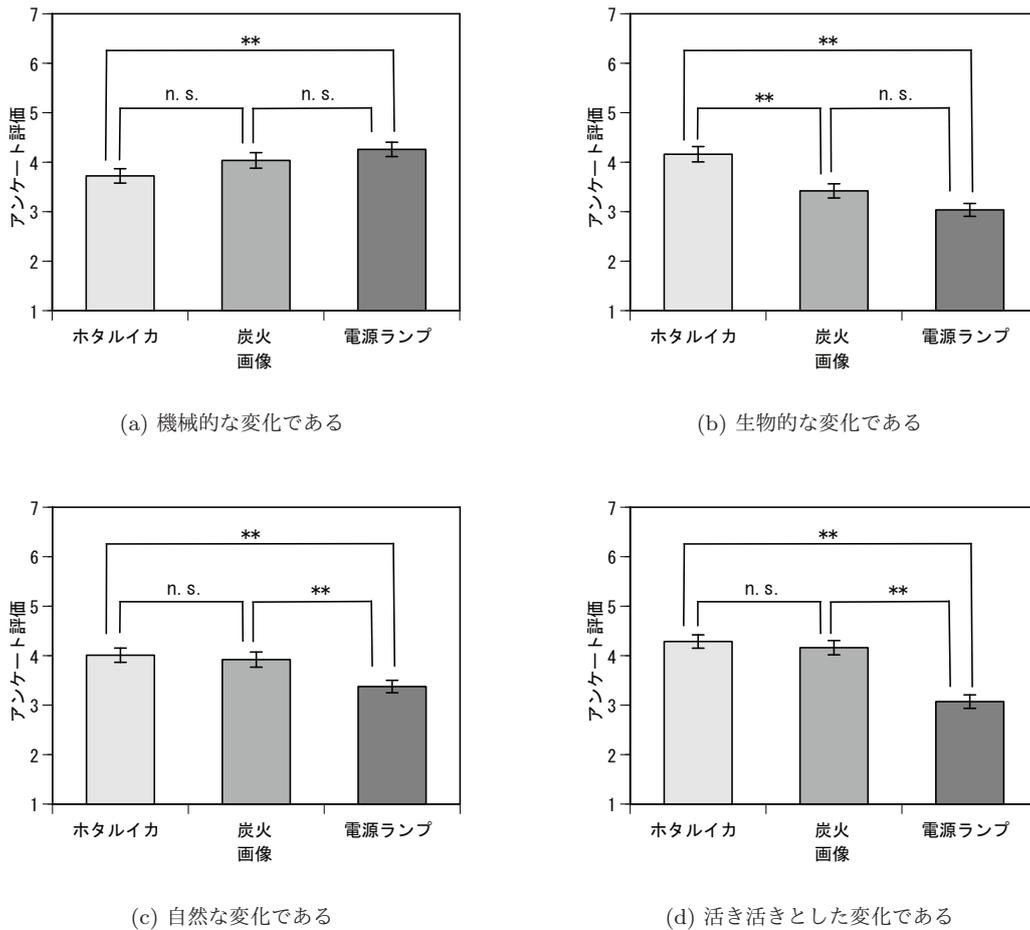


図 4 画像要因の主効果が確認された質問 エラーバーは標準誤差, \*\*:  $p < .01$ , n.s.:  $p \geq .05$

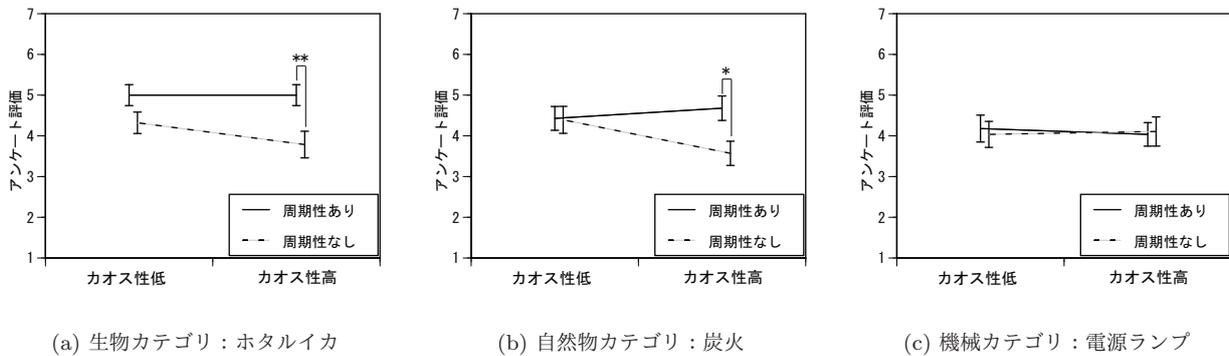


図 5 明るさの変化は画像中の対象物の発光変化としてふさわしい  
画像別の周期性要因×カオス性要因の分散分析結果  
エラーバーは標準誤差, \*\*:  $p < .01$ , \*:  $p < .05$

して評定値が有意に高いことが確認された ( $F(1,324) = 100.32, p < .01$ ). また, 周期性要因×カオス性要因の交互作用が有意に存在した ( $F(1,324) = 28.59, p < .01$ , 図 2(d)). さらに, カオス性要因による単純主効果が周期性あり水準において有意に確認され, カオス性の上昇による予測困難性の認識の向上が見られた ( $F(1,324) = 65.51, p < .01$ ).

### 3.8 生き活きとした変化である

カテゴリ知識要因の主効果が有意に確認された ( $F(2,324) = 24.68, p < .05$ ). 評定値は, ホタルイカ (平均 4.29), 炭火 (平均 4.16), 電源ランプ (平均 3.07) の順に高く, 電源ランプはホタルイカ, 炭火と比較して評定値が有意に低いことが確認された (ホタルイカ-電源ランプ:  $p < .01$ , 炭火-電源ランプ:  $p < .01$ , 図 4(d)).

### 3.9 明るさの変化は画像中の対象物の発光変化としてふさわしい

ホタルイカの画像を使用した発光変化パターンでは、周期性要因の主効果が存在し、周期性あり水準は周期性なし水準と比較して評定値が有意に高いことが確認された ( $F(1,324) = 11.63, p < .01$ ). カオス性要因の主効果は存在しなかった ( $F(1,324) = 0.93, p = .34$ ). 周期性要因×カオス性要因の交互作用は確認されなかった ( $F(1,324) = 0.93, p = .34$ , 図 5(a)).

炭火の画像画像を使用した発光変化パターンでは、周期性要因の主効果は存在しなかった ( $F(1,324) = 3.50, p = .06$ ). カオス性要因の主効果は存在しなかった ( $F(1,324) = 0.87, p = .35$ ). 周期性要因×カオス性要因の交互作用は確認されなかった ( $F(1,324) = 3.07, p = .08$ , 図 5(b)).

電源ランプの画像画像を使用した発光変化パターンでは、周期性要因の主効果は存在しなかった ( $F(1,324) = 0.01, p = .91$ ). カオス性要因の主効果は存在しなかった ( $F(1,324) = 0.01, p = .91$ ). 周期性要因×カオス性要因の交互作用は確認されなかった ( $F(1,324) = 0.11, p = .74$ , 図 5(c)).

## 4. 議論

### 4.1 予測可能性

予測可能性に関連する質問項目“変化の周期性を認識することができる”, “複雑な変化である”, “ランダムな変化である”, “予想するのが難しい変化である”では, 正負は異なるが同様の周期性要因×カオス性要因の交互作用が得られた. 周期性要因の周期性あり水準では, カオス性の上昇による周期性の認識の低下と複雑性, ランダム性, 予測困難性の向上が, カオス性要因による単純主効果から確認された. また, 周期あり水準は周期なし水準と比較して, 周期性が高く, 複雑性, ランダム性, 予測困難性が低いことが周期性要因の主効果から確認された. 以上の結果は, 周期性あり水準ではカオス性によって予測可能性が変化するが, 実験参加者は周期性の有無を明確に認識できていたことを示す.

### 4.2 カオス性がアニメシー知覚に与える影響

生物性に関する質問項目“生物的な変化である”では, 周期性要因×カオス性要因の交互作用が存在し, 周期性あり水準ではカオス性の上昇による生物性の評定値の向上が確認されたが, 周期性なし水準では確認されなかった. この結果から, 時系列変化のカオス性の上昇による人のアニメシー知覚の向上には時系列変化の周期性が必要であることが示され, 「時系列変化に対する人のアニメシー知覚には, 時系列変化のカオス性よりも周期性の方が寄与している」とした仮説が支持される.

### 4.3 対象のカテゴリ知識がアニメシー知覚に与える影響

“機械的な変化である”の質問項目では, 電源ランプの画像を使用した発光パターンがホタルイカの画像を使用した発光パターンと比べて評定値が有意に高くなった. “生物的な変化である”の質問項目では, ホタルイカの画像を使用した発光パターンが炭火と電源ランプの画像を使用した発光パターンと比べて評定値が有意に高くなった. “自然な変化である”, “活き活きとした変化である”の質問項目では, 電源ランプの画像を使用した発光パターンがホタルイカと炭火の画像を使用した発光パターンと比べて評定値が有意に低くなった. 以上の結果から, 発光物体のカテゴリ知識の違いによって発光変化パターンから得られる印象に差が生じることが示され, 「人のアニメシー知覚には観測対象のカテゴリ知識が寄与しており, 同じ時系列変化であっても, 対象のカテゴリ知識の違いによって得られる印象に差が生じる」とした仮説が支持される.

また, “明るさの変化は画像中の対象物の発光変化としてふさわしい”の質問項目では, 画像別の周期性要因×カオス性要因の分析結果に差が存在した. ホタルイカの画像を使用した発光変化パターン分析結果からは周期性要因の主効果が確認され, 周期性あり水準が周期性なし水準と比較して有意に評定値が高かった. 一方で, 炭火と電源ランプの画像を使用した発光変化パターンからは確認されなかった. また, カオス性要因の主効果と周期性要因×カオス性要因の交互作用はいずれの画像を使用した発光変化パターンにおいても確認されなかった. これらの結果から, 生物カテゴリの対象物に対するアニメシー知覚にはカオス性よりも周期性の方が寄与していることが示され, 「時系列変化に対する人のアニメシー知覚には, 時系列変化のカオス性よりも周期性の方が寄与している」とした仮説が支持される.

### 4.4 本研究の制限

本研究では, 周期性要因として周期性あり水準 (ロジスティック写像) と周期性なし水準 (間欠カオス法) を用いたが, 他に適切なカオス方程式が存在する可能性がある. カオス性要因についても, カオス性の高低の2水準に留まっている. また, カオスの縁に関する比較も行われていない. カテゴリ知識要因についてもカテゴリごとに画像を増やす必要がある.

## 5. まとめ

本研究では, 時系列変化に対する人のアニメシー知覚について検証した. 仮説として, 「時系列変化に対する人のアニメシー知覚には, 時系列変化のカオス性よりも周期性の方が寄与している」, 「人のアニメシー知覚には観測対象のカテゴリ知識が寄与しており, 同じ時系列変化であっても, 対象のカテゴリ知識の違いによって得られる印象に差

が生じる」とし、アニメシー知覚とカオス性、周期性、観測対象のカテゴリ知識の関係を検証することを目的とした。そこで、周期性要因 2 種類 (周期性あり, 周期性なし) ×カオス性要因 2 種類 (カオス性低, カオス性高) ×カテゴリ知識要因 3 種類 (カテゴリ知識が異なる画像 (ホタルイカ, 炭火, 電源ランプ)) の 3 要因 12 パターンの発光変化パターンを使用したアニメシー知覚実験を行った。実験結果から、時系列変化に対する人のアニメシー知覚には、時系列変化のカオス性よりも周期性の方が寄与しており、観測対象のカテゴリ知識によって、変化から得られる印象に差が生じることが示された。本研究で示されたアニメシー知覚と上記の 3 要因の関係は、生物らしいロボットや人工知能の開発に役立つ可能性がある。

## 6. 展望

本研究の成果から、アニメシー知覚と周期性、カオス性、カテゴリ知識の 3 要因との関係をより詳しく検証し、生物らしいロボットの開発に役立てることで、ロボットと人間の関係はより友好的なものになると考えられる。

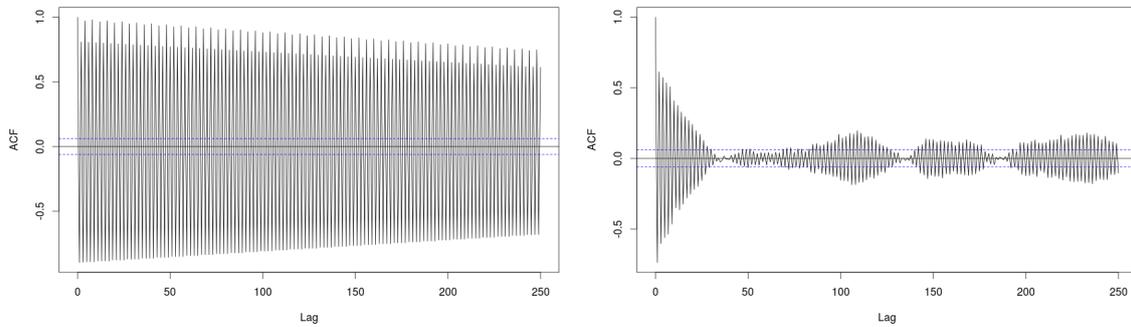
謝辞 本研究は JSPS 科研費 26118005, 15H02735 の助成を受けたものである。記して感謝する。

## 参考文献

- [1] 阿部宣男, 稲垣照美, 石川秀之, 松井隆文, 安久正紘,:ホタルの光と人の感性について-発光現象のゆらぎ特性, 感性工学研究論文集, 2003.
- [2] Haruaki Fukuda and Kazuhiro Ueda,:Interaction with a Moving Object Affects One's Perception of Its Animacy,*International Journal of Social Robotics*, Vol. 2, No. 2, pp. 187-193, 2010.
- [3] Stuart A. Kauffman,:Antichaos and adaptation,*Scientific American*, Vol. 265, No. 2, pp. 78-84, 9 1991.
- [4] Haruaki Fukuda and Kazuhiro Ueda,:An erp study on neural mechanism for animacy perception using real animate things,*Japanese Cognitive Science Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 64-78, 2011.

## 付 録

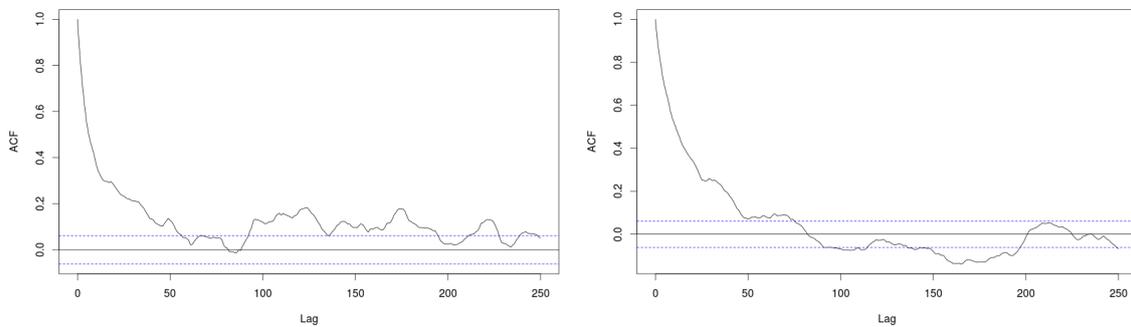
### A.1 カオス方程式の自己相関分析結果



(a) ロジスティック写像 :  
リアプノフ指数=0.1,  $a = 3.5739$

(b) ロジスティック写像 :  
リアプノフ指数=0.5,  $a = 3.6826$

図 A.1 自己相関グラフ : ロジスティック写像



(a) 間欠カオス法 :  
リアプノフ指数 = 0.1, 初期値 = 0.4205

(b) 間欠カオス法 :  
リアプノフ指数=0.5, 初期値 = 0.27975

図 A.2 自己相関グラフ : 間欠カオス法