

## 認知過程の定量的評価のための瞬目発生パターンの解析と数理モデル

Analyses and mathematical models of spontaneous eyeblink patterns  
for quantitative estimation of human psychological process

研究代表者 琉球大学工学部情報工学科 星野 聖  
Assoc. Prof., Department of Information Engineering, Faculty of Engineering,  
University of the Ryukyus

In this study, the author conducted nonlinear analyses and mathematical models for spontaneous eyeblink patterns for the purpose of quantitative estimation of human psychological process. The research was mainly composed of three parts as follows. First, Markov properties were applied to the spontaneous interblink intervals. Subjects with and without mental task exhibited weak and strong Markov properties respectively. The experimental results suggested that blinks evoked by transient cognitive factors occur randomly according to the current states of the subjects. Second, periodic regularity was investigated with one-dimensional maps, the Poisson regime test, and temporal fractal analysis. The results suggested that the spontaneous blink patterns have regularity with various time scales and that temporal fractal dimension changes according to the psychological attitudes. Third, the author presumed first-passage-time probability densities of the Ornstein-Uhlenbeck process as one-dimensional stochastic models for spontaneous eyeblink. The curve fitting technique showed that the threshold of a virtual blink generator changed according to the vigilance of subjects.

### 1. 研究目的

自発的に生起する瞬目（まばたき）は、注意や関心、不安や驚き、疲労<sup>1)</sup>や覚醒水準などの有用な生理的指標となる。しかし従来の瞬目研究のほとんどは、単位時間当たりの平均値と分散しか統計的測度として利用されてこなかった。これらの測度は直観的に把握しやすく、解析も容易であるが、データがもつ情報の一面しか表現していない。もし反応の起こり方の規則性やパターンといった別の統計的測度が活用できれば、より多くの生体情報を得ることが可能になる。さらに、系の内部が洞察できる形で瞬目を数理モデル化できれば定量的評価が可能となり、生理的指標に用いる際の理論的根拠ともなる。

本研究では、第一に、マルコフ性<sup>2)</sup>の見地から瞬目の起こり方を定量的に解析する。第二に、反応のランダム性のなかに潜む規則性を、時間的フラクタル解析により明らかにする。第三に、1次元拡散過程により系をモデル化し、覚醒水準低下時に生じる独特な瞬目パターンについて考察する。

### 2. 自発性瞬目の反応間隔のマルコフ性

#### 2.1 序言

自発的に生起する瞬目は1分間に20回程

度の頻度で発生し、眼球表面の乾燥防止や、塵埃の洗浄に主要な生理学的意義があると考えられている。ところが、乾燥や塵埃などの物理的刺激を除去しても、瞬目はなくならないどころか、頻度はそれほど変化せず、むしろ不安や驚き、注意といった認知的要因、もしくは覚醒水準によって、頻度やパターンが大きく変化することが報告されている。

本章では、自発性瞬目の反応間隔を規定している要因とその程度とを定量的に解析するため、瞬目データを隣り合う反応間の時間間隔系列に置き換え、その統計的性質をマルコフ性<sup>2)</sup>の見地から検討した。実験は安静時と心的負荷時との2条件で実施し、両者のマルコフ性の次数と値を比較することにより検討を行った。

#### 2.2 統計的測度の定義

瞬目の反応系列を隣り合う反応の時間間隔系列に置き換えた確率過程は、時間的に継続している2つの事象の分布の過程を、極めて部分的にしか記述していない。そのため、連続過程に比べて、適用できる理論が制約される。そこで、現時刻における事象が過去のどれくらいの時刻までさかのぼった事象に從属しているかを定量的に推定するため、從属度

なる統計的測度  $D_m$  を定義する<sup>2)</sup>。マルコフ性のない独立過程の場合、 $D_m = 0$  となり、反対に、マルコフ性の最も強い完全従属過程の場合、 $D_m = 1$  となる。 $D_m$  は、現在から数えて過去  $m$  個までの事象の従属度を表すため、 $m$  の増加に伴って  $D_m$  は単純増加し、現在の事象に影響を及ぼさなくなる過去にまで遡った時点で  $D_m$  は飽和し、この時の  $m$  の値がマルコフ過程の次数を表す。

### 2. 3 方法

測定には、垂直方向の眼球電図 (EOG) 法を用いた。銀皿電極を右眼角膜上方 4 cm の前額部と下方 3 cm の頬の 2 箇所装着し、右耳朶を不関電極とした。導出した電圧波形はデータレコーダ (ソニー KS616) に記録し、サンプリング周波数 1 kHz で A-D 変換した後、解析を行った。瞬目計測を被験者に意識させないため、頭頂部 (脳波の Cz 導出に相当)、非利き腕の小指と前腕 (皮膚電気反射の測定に相当)、胸部 (心電図の近似 II 誘導に相当) に銀皿電極を、また母指付け根 (母指球からのマイクロバイブレーション測定に相当) に加速度ピックアップを、それぞれ装着した。

2 つの条件で実験を行った。第一は心理的要因を排除するため、安静時の瞬目を 30 分間測定した。第二は心理的要因を介在させるため、暗算作業時の瞬目を 30 分間測定した。加算課題はスピーカから一桁数字を 2 個ずつ提示し、結果をキーボードから入力させた。実験はすべて座位で実施し、眼位についての特別な指示は与えなかった。

### 2. 4 結果

図 1 に、全被験者における従属度  $D_m$  の次数とその値を示す。図中、白丸は安静時を、黒丸は心的負荷時をそれぞれ表す。安静時の従属度の次数の最頻値が 4 であるのに対して、心的負荷時のそれは 2 であり、明瞭な違いが認められた。また、 $D_m$  の値に対する  $\chi^2$  検定の結果でも、両者のあいだに統計的な有意差が認められた ( $p < 0.01$ )。

定常性のある物理刺激により瞬目が誘発されるため、マルコフ性が比較的強い。これは現在の事象がかなりの程度、過去の事象の起こり方によって生起していることを意味する。ところが心的負荷が加わると、過渡的に変化する注意や関心、緊張や覚醒水準などの認知機構により修飾を受け、反応間隔のマルコフ

性が極めて弱くなる。すなわち、現在の事象が過去の事象の起こり方に従わず、もっぱら現在の状態により反応が生起していることを意味する。

## 3. 瞬目間隔の 1 次元写像とフラクタル性

### 3. 1 序言

前章では、瞬目パターンをマルコフ性の見地から定量化した。しかし、瞬目間隔における過去への従属度はかなり弱く、いずれの条件下においてもほとんどランダムな事象にさえ見える。前章で用いた解析手法では、反応の起こり方に何らかの規則性があったとしても、平均値と分散の時間変動に隠れてしまう場合には、十分な解析力を持たないことが予想される。ランダムに見えながら、ある独特の規則性を秘めて形成されているような構造や形態には、フラクタル解析が有効な解析手法となる。

本章では、瞬目間隔の 1 次元写像、ポアソン分布との適合度の解析、時間的フラクタル解析を用いて、反応の起こり方のランダム性の中に潜む規則性について検討した。

### 3. 2 方法

心理的ストレスに応じて、3 種類の実験条件を設定した。第一は、開眼前方視で安静にさせた。第二は、非利き腕の手関節から先を、摂氏 14 度の怪度冷水に 5 分間浸し 1 分間引き上げる操作を繰り返した。第三は、一桁数字の対をスピーカから音声で提示し、加算の結果をキーボードから入力させた。上記 3 種類の実験はそれぞれ、心理的ストレスがない状態、受動的状況によりストレスが発生する状態、能動的態度によりストレスが発生する状態、に対応している。

### 3. 3 結果

図 2 に、典型的な瞬目間隔の 1 次元写像の例を示す。図中、横軸は  $n$  個目の反応間隔、縦軸は  $n + 1$  個目の反応間隔である。上段と下段では、時間スケールを 3 分の 1 に変えて表示しているものの、両者の 1 次元写像には、三角形あるいは四角形の軌道が共通して認められた。1 次元写像の軌道分布のこの特徴は、反応間隔の平均値が時間的に変動しているものの、瞬目が 3 ないし 4 周期からなる時間的フラクタル構造を持つことを意味した。理論的ポアソン性との適応度を通して時間変化構造の定量化を試みた結果でも、瞬目が何らか

の規則性により群発的に生起することが定量的に明らかとなった。

反応間隔の累積度数分布を両対数でプロットしたところ、3条件ともかなり広い範囲で直線性が認められた。両対数でのべき指数に相当する直線の傾き $-a$ が、そのままフラクタル次元 $D$ となるため、回帰直線を求めて時間的フラクタル次元を比較すると、能動的な心理状態によりフラクタル次元が減少し、よりランダムに瞬目が生起する傾向が認められた<sup>3)</sup>。集中力や関心といった加算作業時の能動的な心理変化が、瞬目発生パターンをよりランダムにしたものと推測される。

#### 4. 自発性瞬目の1次元拡散モデル

##### 4.1 序言

これまでの研究では、瞬目反応とはどのような物理過程なのか。瞬目が起きる条件とは何か。次の反応が起きるまでどのような状態が続くのか。覚醒水準や心理的要因は、どのような形で瞬目に影響を及ぼすのか。どのような機序で群発パターンが起こるのか、といった数理モデルによる基礎的な検討は皆無であった。

本研究では、1次元上のブラウン運動を想定した瞬目の確率微分方程式モデルを提唱する。このモデルは、現象の背後にあってそれを支配する物理過程を想定できる形となっている。併せて、このモデルを用いて、覚醒水準低下時における瞬目群発化の解明も試みる。

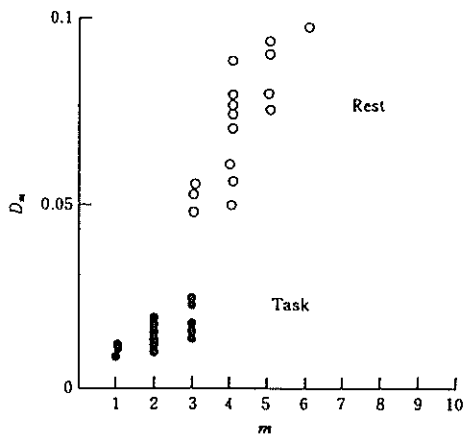


図1 瞬目間隔のマルコフ性の次数と値

#### 4.2 モデルの構成

瞬目発生器を想定し、以下のように数学的に定義する。瞬目発生器の尺度を、パラメータ $X$ で特徴づける。 $X$ の物理的意味は、発生器内部の電位を想定する。発生器は白色雑音により駆動され、外部からの入力により電位が変動するが、入力がない場合には一定の静止電位に減衰する。ここで、入力に相当するものは、角膜の乾燥や塵埃、涙液の涙道への流出抵抗、開眼に関与する筋の疲労などの末梢刺激である。電位がある閾値に達すると反応が起き、電位は初期値あるいは静止電位にリセットされる。このように仮定すると、瞬目発生器のふるまいは初期値からのずれに応じて初期値へ引き戻す力が働くブラウン運動(Ornstein-Uhlenbeck過程)として記述することができ、瞬目間隔は初期値電位 $X_0$ から閾値電位 $S$ への初通過密度関数 $T_0$ として表現できる<sup>4)</sup>。

#### 4.3 パラメータの推定

実験の時間帯を、意識が比較的是っきりしている午前中か、反対に、覚醒水準が大きく低下する昼食後とし、いずれも2時間ほど測定を行った。

分布形状を表すピアソンプロットで瞬目間隔を見る限り、分布領域に顕著な違いは見当たらなかった。そこで図3に、意識がはっきりしていた時と覚醒水準が低下して眠気を感じていた時とのデータの中から、反応間隔

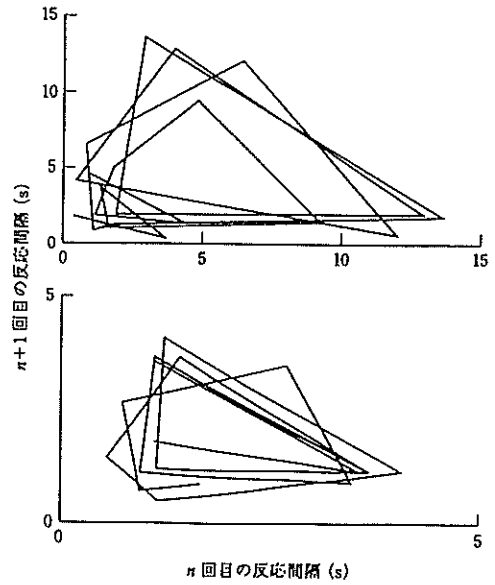


図2 瞬目間隔の1次元写像の例

の平均値がほぼ等しいデータ系列をひとつずつ選び出し、初通過密度関数の閾値と初期値を推定した。図中、上段は覚醒時、下段は覚醒水準低下時を、実線が実測データ、破線が推定結果にそれぞれ相当する。パラメータ推定の結果、覚醒水準低下時には閾値の上昇が認められた。初通過時間密度関数と反応間隔ヒストグラムとは、良好な一致を示した。一連の結果は、Ornstein-Uhlenbeck過程の初通過時間モデルが瞬目発生モデルとして妥当であるだけでなく、覚醒水準低下時の群発化が、同過程における閾値の変化として捉えることが可能であることを示していた。

## 5. 研究成果のまとめ

瞬目の起こり方を定量的に解析し、系の内部をシステム論的に検討するため、2種類の非線形解析と数理モデル構築とを実施した。第一に、マルコフ性の見地から瞬目の起こり方を定量的に解析した。第二に、反応のランダム性のなかに潜む規則性を、時間的フラクタル解析により明らかにした。第三に、1次元拡散過程により系をモデル化し、覚醒水準低下時に生じる独特な瞬目パターンについて考察した。本研究の結果、第一に、現在の瞬目の起こり方が過去の反応の起こり方に従属する度合いは低いこと、しかも精神的負荷が

与えられるとよりランダムになること。第二に、しかし反応の起こり方のランダムさの中には時間的フラクタル性が存在し、時間軸が変化しながらも類似の規則性を伴って瞬目が生起していること。第三に、瞬目は1次元ブラウン運動の一定閾値への初通過時間密度関数で上手く近似できること。覚醒水準低下時の瞬目群発は、一定閾値の上昇として説明が可能であること、が明らかになった。

## 6. 今後の課題と発展

本研究では、系内部に仮定の瞬目発生器を想定し、初期値からのズレに応じて初期値へ引き戻す力が働くような拡散過程を発生器の電位に想定して瞬目をモデル化した。同モデルでは、抹消からの生理的入力がない場合には、瞬目電位は一定閾値に減衰することになる。ところが、角膜の乾燥や塵埃付着などによる生理的入力は絶えず存在し、瞬目の必要度は増加する訳だから、瞬目電位は一定時間後には閾値に向かって平均して増加していると考えた方が生理学的に妥当である。そこで現在は、ドリフトを持つWiener過程の初通過時間関数により瞬目のモデル化を進めている。

近い将来に手掛けようと考えている研究課題は、不完全瞬目の発生機序の解明である。不完全瞬目とは上下眼瞼（まぶた）が完全に閉じない瞬目のことであり、視覚的な負荷時に特異的に発現することが知られている。ビデオ撮影方式とEOG法を併用し、負荷の種類と程度を系統的に組み合わせる解析を行うことにより、同現象の発生条件を明らかにしようと考えている。あわせて、数理モデルの構築により、同現象の発生機序を定量的に検討する予定である。同現象の解明は、人間の心理状態を忠実に反映すると言われている瞬目反応から、さらに多くの生体情報を獲得することを可能にすると思われる。

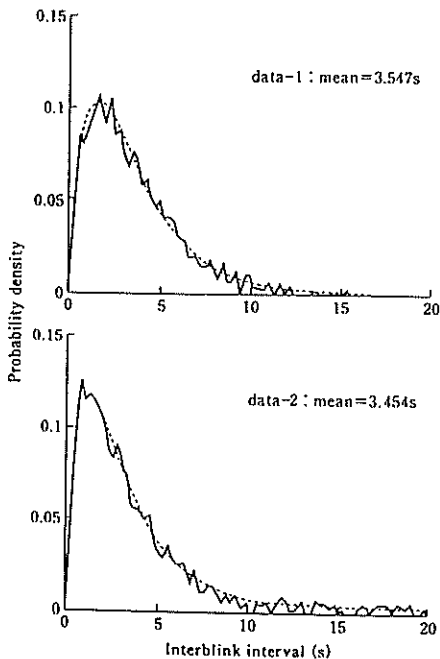


図3 瞬目間隔と初通過時間密度

## 発表論文

- 1) 星野: "視覚負担推定のための自発性瞬目の開瞼時間の解析", テレビ誌, 48, pp. 702-707 (1994)
- 2) 星野: "自発性瞬目の反応間隔のマルコフ性", テレビ誌, 48, pp. 317-322 (1994)
- 3) 星野: "瞬目間隔の1次元写像と時間的フラクタル性", テレビ誌, 50, 印刷中 (1996)
- 4) 星野: "自発性瞬目の1次元拡散モデル", テレビ誌, 49, pp. 62-67 (1995)