瞬目間隔の1次元写像と時間的フラクタル性

正会員 星 野 聖[†]One-dimensional Map and Temporal Fractal
in Spontaneous Interblink IntervalKiyoshi Hoshino[†]

Abstract This study adapted three analyses to spontaneous interblink intervals to investigate the temporal fractal in the human eyeblink. First, periodic regularity was qualitatively investigated with one-dimensional maps. Second, the regularity was quantitatively measured by the Poisson regime test. Third, the temporal fractal dimensions were estimated from the regression coefficients of cumulative frequency distribution of the log-log histograms. The behavior of eyelids was optically measured and transformed into point-series data in three conditions: with no, passive and active stressers respectively. The results were as follows: first, the blinking patterns change mainly in period three or four. Second, the intervals change not at random but with statistically significant regularity. Third, the fractal dimension in subjects with no or passive stressers exhibited great value compared with that in subjects with active stresser. Those results suggest that the spontaneous blink patterns have regularity with various time scales, even though the blink seems to occur randomly, and that the scale which is defined as temporal fractal dimension mainly changes according to the psychological attitudes of subjects.

1. ま え が き

まばたき、特に自発的に生起するまばたき（自発性瞬目。以後、ただ単に瞬目と称す）に関する研究は、これまで主に心理学、医学、人間工学の3分野で行われてきた。心理学的には、興味や関心の度合いと瞬目頻度との関係、性格や精神疾患との関係、脳波や眼球運動との関係、周囲の明るさが瞬目に及ぼす影響、などの基礎研究がなされてきた。医学的には、コンタク

トレンズ装用と瞬目頻度との関係、眼精疲労との関係、眼圧上昇や眼球突出度の判定のための生理的指標、瞬目反射計測による神経疾患の診断、瞬目頻度と脳内物質との関係、などの臨床研究がなされてきた。人間工学的には、居眠り検出のための生理的指標、作業内容と瞬目頻度、うそ発見器への応用、などの応用研究がなされてきた。

ところが従来の瞬目解析では、ほとんどの場合、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。

キーワード：瞬目間隔、時間的フラクタル性、1次元写像、ポアソン性、累積度数分布

1996年2月14日受付、1996年4月2日受付

[†] 琉球大学 工学部情報工学科(〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原1番地, TEL 098-895-2221)

[†] Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus (1, Senbaru, Nishihara-cho, Okinawa 903-01, Japan)

た。確かに、これら2つの指標の変化は、観察者や実験者にとって直観的に把握しやすく、解析も容易である。しかし、これらの統計量は、データがもつ情報の一面しか表現していない。それゆえ、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。

瞬目の反応間隔(以後、瞬目間間隔と称す)パターンを定量化する試みは、著者の知る限り、これまでに2例が報告されているのみである。第一は、瞬目ヒストグラムをワイブル分布へ当てはめたもの¹⁾である。しかし、この研究では、瞬目間間隔がワイブル分布に従わなければならない理論的根拠が不明である。第二は、現在の反応の起こり方が過去の反応の起こり方に従属する度合いを、マルコフ性の見地から定量化したもの²⁾である。しかし、瞬目間間隔における過去への従属度はかなり弱く、ほとんどランダムな事象にさえ見える。そこ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³⁾。フラクタルとは、何らかの自己相似性を持つ構造のことであり、そのパターンの複雑さを定量的に表す尺度がフラクタル次元である。そのなかで、時間変化のパターンに現れるフラクタル性は、特に時間的フラクタルと呼ばれる。時間スケールを変えても類似の時間変化構造が現れるとか、特徴的な時間スケールを持たないような場合、現象の背後に時間的フラクタル構造が存在している可能性がある。この構造は、反応間隔の1次元写像などにより直観的に理解することが可能である。

そこで本研究では、第一に、瞬目間間隔の1次元写像を観察することにより、ランダムさのなかに潜む発生パターンの特有な規則性について定性的に検討した。第二に、ポアソン分布との適合度の解析により、瞬目間間隔パターンに潜む何らかの規則性を定量的に検討した。第三に、瞬目間間隔に時間的フラクタル解析を適用することにより、生体内部状態の変化に伴うフラクタル次元の変化について検討した。

2. 方 法

近赤外線 LED と時定数の小さい CdS を用い、角膜と眼瞼(まぶた)の吸光特性の違いを利用して、眼瞼の動きを測定した。視覚的な違和感を感知させないた

め、2つの光素子は、なるべく眼球の至近距離側方に固定した。CdS の電圧変動はデータレコーダに記録し、サンプリング周波数 1 kHz で A-D 変換したのち、計算機上で瞬目を検出して反応間隔系列を求めた。被験者が瞬目計測を意識すると瞬目パターンが変化するので、実験中は頭頂部と胸部に銀血電極を装着し、瞬目計測をカモフラージュした。

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、14°Cの軽度冷水に5分間浸し1分間引き上げる操作を繰り返した。第三は、1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。第二、第三の実験では、被験者はテンキーの配置に習熟させてから実験を開始した。3条件とも、背景音は比較的静かな室内環境と等価にし、すべて座位で実験を行った。1回の測定時間は30分間とし、5日間にわたって試行を実施した。

被験者は、コンタクトレンズ非装用の男女学生6名(21~33歳、疾患等による異常眼球運動なし)であった。

3. 結 果

3.1 瞬目間間隔の1次元写像

眼瞼運動を光学的に測定して得られた時系列データのうち、電圧の各ピークを閉瞼と見なし、隣り合う反応間の時間間隔系列に置き換え、以下のすべての解析を行った。その際、不完全瞬目はデータから除外した。

図1に、全被験者の反応間隔ヒストグラムを示す。上段は安静時を、中段は寒冷昇圧時を、下段は加算作業時を表し、それぞれ横軸は反応間隔を、縦軸は確率密度を示している。3つを比較すると、ピークの位置が若干ずれているものの、分布形状は類似しており、中央より左側にピークを持つガンマ分布様の形状を示した。この分布傾向は、個々の被験者ごとの反応間隔ヒストグラムでも、ほぼ共通していた。

図2に、典型的な瞬目間間隔の1次元写像の例を示す。上段および下段とも、同一試行日に同一被験者から得られたデータであり、点系列のなかで1次元写像の軌道の分布形状が比較的明瞭な一連のデータを選んで図示した。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

図 1 全被験者における反応間隔ヒストグラム
Interblink histogram.

図 2 瞬目間隔の 1 次元写像の例
Examples of one-dimensional maps of interblink intervals.

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

図 3 反応間隔の 1 次元写像と点系列データの模式図
Schematic patterns of one-dimensional maps and point series data of inter-response intervals.

が共通して認められた。時間スケールを変化させた場合でも類似の分布形状が見られるということは、平均値が時間的に変動しているものの、反応間隔に類似の時間変化構造が存在することを示唆するものである。同様な傾向は、ほかの被験者でも頻繁に認められた。ただし、軌道の分布形状の明瞭さは、切り出すデータ系列の範囲に依存した。

瞬目間隔の 1 次元写像に三角形あるいは四角形の軌道分布が認められるとは、どういう意味か。ここで、反応間隔が短い場合と長い場合の 2 種類しかないと仮定すると、図 3 の模式図に示すような 1 次元写像と点系列データとが得られる。本研究で頻繁に見られた写像は、③もしくは⑤に相当するから、基本的には短い間隔で連続 3 回の反応が起こり、場合によっては、その途中で 1 回反応が起こって、再び 3 回程度の反応が連続するパターンであることがわかる。時間スケールを変えても類似の写像が見られることから、瞬目間隔の変化パターンは、3 ないし 4 周期からなる時間的フラクタル構造を持つと考えられる。

3.2 ポアソン性の検討

前節では、定性的であるが、瞬目間隔の変化パターンに特有の時間変化構造があることを確認できた。しかし、全データにわたって同様の傾向があるかどうかを定量的に解析する必要がある。そこで本節では、ポアソン性の検討⁴⁾を通して、時間変化構造の定量化を試みる。すなわち、もし瞬目間隔がポアソン過程

に従って生起しているなら、瞬目はランダムに発生していることになる．反対に、ポアソン過程の特徴を表す理論的パラメータ値と比べて、もし瞬目間隔が有意差を持つなら、事象はランダムではなく、何らかの規則性により生起していることになる．

定量化の方法は次の通りである．時間軸を等間隔 Δ に分割し、各区間に生起した事象の数を n_i ; $i=1, 2, \dots, K$ とする． n_i の標本平均を $\bar{n}$ とすれば、次式のように、 $\bar{n}$ からの n_i の広がりによってポアソン性を検討することができる．

$$d = \sum_{i=1}^K \frac{(n_i - \bar{n})^2}{\bar{n}} \quad (1)$$

もし、ある事象がポアソン過程に従うなら、 d は自由度 $K-1$ の χ^2 分布に従う．また、 $d/(K-1)$ は事象生起個数の分散と平均生起個数の比を意味するから、理論的なポアソン過程の場合は値が 1 となる．ある現象の反応間隔が一定に近づけば値は小さくなるし、逆に反応間隔が群発化すれば値は大きくなる．

$d/(K-1)$ の値は、分割する時間間隔 Δ に応じて変化する．すなわち、 Δ が極端に短ければ、各区間に生起する事象数はほぼ 0 か 1 となるため、現象の生起間隔が互いに独立であるポアソン過程とほとんど等価となってしまう．同様に、 Δ が長すぎる場合も、各区間内に生起する事象数は正規分布に近づくため、区間のあいだでの分散は小さくなる．予備的な検討によれば、被験者や条件とは無関係に、 Δ がおよそ 20 ないし 30 秒のときに $d/(K-1)$ の値が最大となった．この結果は、約 20 秒間くらいの区間に分割してデータを眺めたときに、瞬目がクラスタ状に生起する状態と抑制された状態との対比を最も明瞭に観察できることを意味している．

そこで本研究では、時間間隔 Δ をヒューリスティックに変化させ、被験者、試行日、条件ごとに求めた $d/(K-1)$ のなかの最大値を実験値とし、同じ自由度のときの χ^2 分布との適合度を、平均値の差により検討した．条件ごとに分けて解析した結果、実験値と理論値のあいだには有意な差が認められ（安静時: $t=2.786$; 寒冷昇圧時: $t=2.801$; 加算作業時: $t=2.990$. ともに $p < 0.01$, $d_f=29$ ）、瞬目がランダムに生起しているのではなく、何らかの規則性により群発化する傾向があることが定量的に示された．

3.3 時間的フラクタル次元

前節では、瞬目間隔がランダムでなく、何らかの規則性を持つことが示された．そこで本節では、時間的フラクタル性の観点から、瞬目間隔の時間変化構造を定量化する．

図 4 各被験者の累積度数分布の両対数プロット
Log-log plots of cumulative frequency distribution
in each subject.

図 4 に、反応間隔の比率の両対数プロットを示す．図の横軸は、反応間隔を対数目盛りで表示しており、縦軸は、各々の反応間隔よりも長い反応間隔の百分率を対数目盛りで表示している．上段は安静時を、中段は寒冷昇圧時を、下段は加算作業時を表す．同図では被験者ごとにデータ整理を行っており、6 種類の記号が、6 名の被験者に対応する．分布形状からわかるように、各条件とも個人差は小さかった．また、分布の両端、すなわち極めて短いか、あるいは極めて長い反応間隔の部分を除けば、3 条件とも、かなり広い範囲で直線性が認められた．

図 4 のような累積分布では、両対数でのベキ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（その理論的根拠については、次章で言及する）．ところが、同図からわかるように、すべての反応間隔にわたり直線性が成り立っているわけではない．そこで本研究では、なるべく広いデータ範囲で、しかも推定誤差が小さい係数を、フラクタル性が成り立つ範囲および次元とするため、次式のような評価関数 C を設定し、これが最大となるような回帰直線を求めた．

$$C = N/|E_n - E_{n-1}| \quad (2)$$

図5 直線回帰による時間的フラクタル次元の推定
Estimated temporal fractal dimensions by regression coefficient.

表1 推定された回帰係数と各パラメータ
Estimated coefficients and parameters.

	傾き	データ範囲	データ数	XからYへの推定誤差
安静時	-1.79	0.5~16.5(s)	33	8.85×10^{-2}
寒冷 昇圧時	-1.62	1.0~17.0(s)	33	4.96×10^{-2}
加算 作業時	-1.12	0.0~18.5(s)	38	4.53×10^{-2}

ただし,

$$N = X_{\max} - X_{\min} + 1$$

$$E_n = E(X_{\max} - X_{\min} + 1)$$

$$E_{n-1} = E(X_{\max-1} - X_{\min} + 1)$$

ここで, N はデータ数. $X_{\min}$ と $X_{\max}$ は, それぞれデータ範囲の始点と終点. E_n は, N 個のデータの推定誤差を表す.

図5に, 両対数プロットに回帰直線を当てはめた結果を示す. 図中, 実線は全被験者の累積分布を, 破線は当てはめた回帰直線を表す. ただし, 上段の回帰直

線では, 直線の傾きが見やすいように, y 切片をずらして表示した. 上段は安静時を, 中段は寒冷昇圧時を, 下段は加算作業時を示している. また, 回帰係数と各パラメータの推定結果を表1に示す. 推定の結果, 加算作業時のフラクタル次元が低かったが, より強い直線性を示していた.

評価関数を設定するため, 事前に行った予備的検討では, データ数が増加すると, ある時点から推定誤差が指数関数的に増加した. それゆえ, 推定誤差が大きく増加し始める直前のデータ範囲からフラクタル次元が求められる場合が多く, 前述の評価関数によりおおむね妥当な値が得られた. また, 妥当なデータ範囲でフラクタル次元が求められるように, 反応間隔ヒストグラムを参考にして, 最低限含まれるべきデータ範囲を, 事前に $X_{\min} \leq 1.0$ s, $X_{\max} \geq 15.0$ s と定めた.

4. 考 察

何らかの自己相似性を持つ構造や形態が存在する場合, そのパターンの複雑さを定量的に表す尺度がフラクタル次元である³⁾. 例えば, ある図形が全体を $1/r$ に縮小した相似図形 r^D 個によって構成されるとき, 指数 D がフラクタル次元に相当する. このような拡大縮小に関する規則性, すなわちスケール不変性は, 時間的に変化する現象にも存在し, このような構造は時間的フラクタルと呼ばれる. 解析方法としては, 累積度数分布を利用する方法, 埋め込みによる離散時系列の相関次元を求める方法, 時系列データをパルス列として解析する方法, などがある⁵⁾. 本研究では, 累積度数分布を利用する方法を採用したが, フラクタル構造を持つ場合, x 軸と y 軸の関係が $y = ax^{-D}$ を満たすことから, 両対数目盛りでプロットすると分布がほぼ直線になる. 瞬目間隔に時間的フラクタル性があるとは, 一見ランダムに生起しているように見えながら, じつは瞬目の起こり方には明瞭な規則性があることを意味する. 例えば, ある時点では短い時間スケールで規則的に生起し, 別の時点では長い時間スケールで規則的に生起する. しかし, 時間スケールが経時的に変化するため, 現象的にはランダムな印象を与えるのである.

高安⁶⁾ は, 遅延微分方程式で表現される非線形なフィードバック系により, フラクタル構造が作られることを指摘している. 一方, 星野⁷⁾ は, 瞬目発生系にブラウン運動を想定しながら, 出力の一部が瞬目発生系に戻るような経路や, 瞬目発生系が付近の活動度に依存する可能性を指摘している. 瞬目発生機序を考えると, 生体内部ではブラウン運動的に, すなわち時間的

図 6 写像関数と軌道の例
Simulated map function and trajectory.

にポアソン分布に従ってランダムに眼瞼に出力がなされているものの、出力の一部は自らにフィードバックされている。しかも、遅延微分方程式で記述されるフィードバック系のように、瞬目発生系でも、現在の出力が過去のある時点から現在までのすべての出力の関数となっていることが予想される。それゆえ、瞬目が時間的フラクタル性を持つことや、その次元が生体の内部状態により変化することは、きわめて妥当な結果であろう。

ある不規則な現象が決定論的な機序により生起している場合には、1次元写像による反応間隔の解析は、現象の直観的理解を手助けしてくれる。1次元写像には、ある写像点から自分自身への写像を決定する機序、すなわち、ある時点の反応から次の反応を生み出す機序が定性的に表現される。いま、図6上段のような2峰性の写像関数を導入する。この写像関数は、実

験値の反応間隔のなかで代表的な数列をいくつか選んでプロットし、各点を通るように補間曲線で結んだものである。この関数からは図6下段のような軌道が生成され、実験により得られた図2とよく類似した軌道形状が得られる。写像関数の詳細な検討は別稿に譲るが、1次元写像を生み出す写像関数を検討したり、差分方程式による記述を試みることにより、瞬目発生機序をさらに明らかに解明できるものと考えられる。しかし、瞬目は何らかの遅延微分方程式で記述できるとすれば、瞬目は比較的多自由度の非線形力学系に基づいて発生しているのかもしれない。

無相関なノイズを1回積分すると、ブラウン運動になり、ブラウン運動のグラフのフラクタル次元は1.5となることが知られている⁸⁾。非整数階積分により、任意の次元のフラクタル曲線が作れるが、次元が1.5よりも低ければ、よりノイズ的な性質に近づくし、それよりも高ければ、滑らかな変化になる。本研究では、瞬目間隔のフラクタル次元が、加算作業を負荷することにより、安静時や寒冷昇圧時よりも低い値となった。条件間の次元の違いを、ブラウン運動の次元を中心にして比較すると、 1.5 ± 0.3 程度の変化を示したことになる。この結果は、作業によって時間スケールの変化の仕方が、よりランダムになったことを物語っている。すなわち安静時や寒冷昇圧時には、時間スケールが変動しながらも、規則性を保ちながら反応が生起していた。これは、主な反応生起要因が乾燥防止や塵埃除去などの生理学的必要性であるため、比較的决定論的な機序に忠実に従って反応が生起したためと予想される。一方、加算作業を実施すると、積分的な要素が減少し、より微分的に反応するようになった。換言すれば、瞬目系の内部状態の変化に応じた出力よりは、何らかの外部入力による出力の方が多くなったことを意味する。これは、心理的要因が多く関与するようになったため、反応生起が決定論的な機序に従う割合が低下し、あるいはパラメータが変化し、ランダム性がより増加したためと考えられる。類似の結果が、瞬目におけるマルコフ性の検討²⁾でも得られている。また、外部リズムに強制的に合わせようとする、生体固有のリズムが、よりランダムになる⁹⁾ことが知られており、時間的フラクタルにおける次元の大きさは、心身の安定状態や健康状態を表しているのかもしれない。

ストレス負荷時でありながら、加算作業時と寒冷昇圧時とのあいだに違いが見られたのはなぜか。ストレスは一般に、能動的な挑戦の態度に伴うもの(タイプI)と、受け身的態度により発生するもの(タイプ

II) とに分類される。加算作業は前者に、寒冷昇圧は後者に該当する。例えば、ストレス負荷に伴って同じ様に血圧上昇が起きるものの、タイプIではおもに血流量の増加、タイプIIではおもに血管抵抗の増大に起因している。瞬目が心理的影響を強く受けることを考慮すると、集中力や関心といった加算作業時の能動的心理変化が、瞬目発生パターンをよりランダムにしたと推測される。

本実験では、時間的フラクタル構造の強さ、すなわち回帰直線からの推定誤差は、加算作業時の場合が最も小さかった。これは、加算作業時の反応間隔ヒストグラムが、指数分布に比較的近いことを意味する。一方、安静時や寒冷昇圧時の反応間隔ヒストグラムは、加算作業時よりもガウス分布に近いガンマ分布であることを意味している。一般に、ヒストグラムがガンマ分布、とくに指数分布に似た形状を示すとき、その現象はランダムな事象である場合が多い。しかし、これは一定時間内での反応間隔の度数がガンマ分布することを意味するのであって、必ずしも反応生起時刻が互いに独立であるランダム事象であるわけではない。これは、先にポアソン性の検定結果で示した通りである。直観的に反応間隔の累積度数分布を捉える場合、指数分布では普通 $\log y - x$ プロットで直線になり、ガウス分布では $\log y - x^2$ プロットで直線になる¹⁰⁾。

本研究で採用した解析方法は、度数のみを問題としており、そのため、時系列の時間変化を十分に定量化できない欠点を持つ。しかしフラクタル解析は、ばらつきの大きいデータに適用が可能であり、測度として安定した値を得ることができ、しかも複雑なパターンを数少ないパラメータで記述できる、という特徴を持つ。今後、ヒトの各種情報処理機能の解明にも有効性を発揮するものと考ええる。

5. む す び

自発性瞬目の生起パターンに潜む規則性について検討するため、3つの解析を行った。第一に、瞬目間隔の1次元写像から、ランダムさのなかに潜む生起パターンの規則性について定性的に検討した。第二に、ポアソン分布との適合度の解析により、瞬目間隔に潜む特有な規則性を定量的に検討した。第三に、時間的フラクタル解析を適用することにより、生体内部状態の変化に伴う瞬目間隔のフラクタル次元について検討した。

すべての解析は、光学的に測定した眼瞼運動データを反応間隔点系列に変換することにより行った。実験は、安静時、寒冷昇圧時、加算作業時という3条件下で実施した。

実験の結果、3つの事項が明らかとなった。第一に、瞬目間隔の変化パターンは、主に3ないし4周期からなる類似の時間変化構造を持つこと。第二に、瞬目のランダム性の背後には、統計的に有意な規則性があること。第三に、反応間隔の累積度数分布を両対数でプロットすると時間的フラクタル性が認められ、しかも、能動的な心理状態によりフラクタル次元が減少し、よりランダムに反応が生起する傾向が出ることであった。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金奨励研究(A)萌芽(課題番号07858099)、第21回日産学術研究助成金(研究代表者 星野聖)による。本研究の遂行に際し、東京大学先端科学技術研究センター 岡部洋一教授、同学医用電子研究施設 池田研二講師、東京電機大学工学部 斎藤正男教授からは有益な御助言を頂いた。感謝の意を表します。

(参 考 文 献)

- 1) 山田, 宮田: “自発性瞬目のワイブル分布による検討”, 心理学会大会論文集, **48**, p. 50 (1984)
- 2) 星野: “自発性瞬目の反応間隔のマルコフ性”, テレビ誌, **48**, 3, pp. 317-322 (1994)
- 3) B. B. Mandelbrot: “The Fractal Geometry of Nature”, Freeman, San Francisco (1982)
- 4) M. S. Bartlett: “An Introduction to Stochastic Processes”, Cambridge Univ. Press (1955)
- 5) 品川, 瀬野: “医学・生物学とフラクタル解析”, 東京書籍 (1992)
- 6) 高安: “分岐構造とフラクタル”, 別冊・数理科学ゆらぎ・カオス・フラクタル, pp. 134-138, サイエンス社 (1994)
- 7) 星野: “自発性瞬目の1次元拡散モデル”, テレビ誌, **49**, 1, pp. 62-67 (1995)
- 8) 高安: “フラクタルの応用”, 別冊・数理科学ゆらぎ・カオス・フラクタル, pp. 194-198, サイエンス社 (1994)
- 9) 山西, 川人, 鈴木: “ヒトの両手タッピングの位相遷移曲線による解析”, ME 誌, **18**, 2, pp. 99-104 (1980)
- 10) 嶋田, 川添, 原: “ショウジョウバエの摂食行動のフラクタル性”, 動物生理, **6**, 2, pp. 101-107 (1989)

星野 聖 1993年, 東京大学医学系大学院博士課程修了。同年, 東京医科歯科大学医学部助手。1995年, 琉球大学工学部助教授となり, 現在に至る。視覚系の情報処理機構, 聴覚補助代行の研究に従事。医学博士。工学博士。正会員。