香りの生理心理反応へのカオス時系列解析の応用

谷沢茂治†¹, 木村知史†¹, 合原一幸†²ポーラ化成工業株式会社研究所 肌科学研究室†¹
東京大学 工学部計数工学科†²Application of Chaotic Time Series Analyses on
Psychophysiological Responses to OdorsShigeharu Tanizawa†¹, Satoshi Kimura†¹ and Kazuyuki Aihara†²POLA Laboratories, POLA Corporation.†¹
Faculty of Engineering, University of Tokyo.†²

It is well-known that human biological systems produce chaotic behaviors such as rhythms of heart beat and plethysmograph. Odors are known to influence the psychophysiological state of a person, and produce fluctuations in plethysmographs regulated by autonomic system. In this study, we attempted to establish an index of psychophysiological responses induced by odors, using a feature of the chaotic behavior in plethysmograph. Such index could be extremely valuable in a research to characterize odors according to their responses in relation to human emotion.

We first confirmed the chaotic nature of the time-series data of plethysmographs. Correlation dimension, which reflects the chaotic characteristic of self-similarity in the plethysmograph, was estimated by the Grassberger-Procaccia method. Also investigated were relationships among correlation dimensions, physiological and psychological parameters including: 1) effects on correlation dimension of plethysmograph caused by changes in mental states when a pleasant or unpleasant odor is introduced, 2) relationships among psychological index and physiological parameters such as galvanic skin resistance and power spectrum of plethysmograph, 3) effects of physiological parameters on correlation dimension.

The results showed that: 1) correlation dimensions increased when unpleasant odor was introduced, 2) pleasant and unpleasant odors produced differences in galvanic skin resistance and power spectrum, 3) correlation dimension correlated with low-frequency component and ratio of power spectral components related to pleasure, displeasure and anxiety involved in emotion. It is concluded that the correlation dimension is sensitive to different odors and may be used as a reliable physiological index of pleasure and displeasure.

1. 緒 言

良い香りを嗅げば気分が良くなり、悪い匂いを

嗅げば不快な気分になることから、香りが私たちの感情や生理に影響を与えていることは明らかである。

香りの人に対する機能を裏付けるために、脳波、心拍数、脈波や皮膚電位などの非侵襲的な生理計測が多面的に行なわれている。しかし、脳波などの中樞系の計測では被験者への負担が大きく、脈

†¹ 〒221 横浜市神奈川区高島台 27-1; 27-1, Takashimadai, Kanagawa-ku, Yokohama, 221 Japan

†² 〒113 文京区本郷7-3-1; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113 Japan

波や皮膚電位などの末梢系の自律神経機能の計測ではそれらの指標間で一致した変化を示さないことや再現性が悪いなどの問題点が指摘されている。

最近になって、人の体の中には心臓の拍動や指尖容積脈波のリズムのように、カオスの挙動を示す現象があることが分かってきた^{1)~4)}。ゴールドバーガーは、人の心臓の拍動リズムはカオス的な変化をしているが、重症の心疾患にかかった患者では周期的なパターンを示すことを報告した¹⁾。フリーマンらは兎の嗅覚系において、カオス的な神経興奮パターンとその嗅覚認識における機能について調べた²⁾。さらに、佐光らは心血管系パラメータ³⁾の、津田らは指尖脈波⁴⁾のカオス性について検討した。

これらのことから、カオスは生体の循環系や匂いと深い関係があると考えることができる。また、指尖容積脈波の波形が緊張—リラクセスなどの心理状態によって変化し、その周波数成分と心理状態の快—不快（不安との間に関係があることが報告されている^{5)~7)}。そこで指尖容積脈波がカオスであるならば、そのカオスの挙動の特徴を捕らえることにより、香りに対する人の情動の生理心理反応の新規な指標となることが期待される。

本報告は、人の指尖容積脈波はカオスであること、および香り刺激に対する脈波応答の相関次元が心理状態の快—不快の生理指標として有効であること、についての可能性を確認したものである。

2. 実 験

健常な女性10名（20～52歳、平均年齢29歳）に対し **Fig.-1** のような手順に従い、10 分間安静後、匂い呈示前後にブランク（匂いなし）を設定し、好きな香り（レモンとバニラより本人が選択）および嫌いな匂い（トリエチルアミン）を各3分ずつ呈示した。

匂いの呈示順序は、好き→嫌い→嫌い→好きの各半数ずつとした。

2.1 計測項目

心理評価は、匂い呈示前と呈示中の覚醒感、快不快感および匂いに対する嗜好性について、SD法を用いて5段階で行った。生理計測は指尖容積脈波、呼吸および GSR の項目について連続して行った。

2.2 計測条件

被験者は室温 23～24°C のシールドルームで、座位・開眼状態において計測した。

指尖容積脈波（左手第三指末節より時定数 DC で誘導）は日本電気三栄製ポリグラフと脈拍ピックアップ（45261）、呼吸（腹部より誘導）は日本電気三栄製呼吸ピックアップ（45261）、GSR（皮膚電気抵抗：右手第二と三指末節より通電法で誘導）は OG 技研製 BF-102 で測定し、これらのデータはソニー製デジタルデータレコーダー PC-108M に記録した。

2.3 生理パラメータ

生理計測の指尖容積脈波から、フラクタル次元の一つの尺度である相関次元、パワースペクトル

Fig.-1 Experimental Procedure

subject : 10 normal females with ages from 19 to 50 (average 29)

measurement : plethysmogram, galvanic skin resistance, respiration

の低周波成分 (LF : 0.30Hz 以下) と高周波成分 (HF : 0.31Hz 以上) およびその周波数成分比 (Ratio : $R=LF/HF$) の4項目のパラメータを設定した。

2.3.1 指尖容積脈波の相関次元

自然界の海岸線や生体の血管などの図形は、その一部を拡大しても全体と同じような形を示す自己相似性という性質を持っている。カオスの特徴の一つであるこの幾何学的性質を定量的に示す相関次元は、以下の方法により求める。

観測した指尖容積脈波を A/D 変換によってサンプリング間隔が 20ms になるような 1 変数の時系列データに変換する。その自己相関関数が最初に 0 になる時刻より時間遅れ (lag) を求める。次にアトラクタの軌道を再構成⁸⁾ するために、時系列データ ($x_1, x_2, \dots, x_i$) から時間遅れ座標を用いて n 次元ベクトル ($X_1, X_2, \dots, X_N$) を作成する。Grassberger-Procaccia の方法に従って(1)式より相関積分 $C^n(r)$ を計算し、(2)または(3)式のスケーリング側が近似的に成り立つ相関指数 $D(n)$ を求める⁹⁾。再構成空間の次元 n の増大に伴う $D(n)$ の飽和値がフラクタル次元の一つの近似値である相関次元を与える。相関次元の解析はデータ数 : $N=1000$ (20秒間) で行い、総合解析には 1 分間の相関次元の平均値を使用した。

$$C^n(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} (1/N^2) \sum_{i,j=1}^N H(r - |X_i - X_j|) \quad \dots\dots(1)$$

H : ヘビサイド関数, r : 半径,

N : データ数

$$C^n(r) \propto r^{D(n)} \quad \dots\dots(2)$$

$$\log C^n(r) \text{ vs } D(n) \log(r) \quad \dots\dots(3)$$

2.4 カオス特性の評価

時系列データがカオスであることは、自己相似性、軌道不安定性および長期予測不能性の3つの性質、すなわち各々フラクタル次元、リアプノフ指数およびKS エントロピーで評価される。リアプノフ指数の計算は佐野一沢田の方法で求めた¹⁰⁾。

2.5 総合解析

手の動きによるノイズの混入した1名を除き、

9 名について解析を行った。

解析は匂い呈示中の心理価値や生理パラメータの変動を確認し、匂い呈示後20~80秒の1分間のデータを解析対象範囲とした。パラメータの絶対値とブランク (匂い呈示前) に対するパラメータの変化について、心理評価別および匂いの種類別に t-検定および相関分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 指尖容積脈波のカオス特性の確認

指尖容積脈波よりの時系列データがカオスであれば、その時系列データから再構成した n 次元ベクトルのアトラクタ (Fig.-2) が自己相似性、軌道不安定性および長期予測不能性の3つの性質を有している。それらはフラクタル次元が非整数であること、リアプノフ指数とKS エントロピーが共に正であることで原理的には確認できる。実際に、ブランクやトリエチルアミンで、相関次元は2~3の非整数値、リアプノフ指数は正の値を示した (Table-1)。

これによって、観測された指尖容積脈波の時系列データがカオスであることが示唆され、津田⁴⁾らの結果が確認された。

Fig.-2 An attractor in a 3-dimensional phase space reconstructed from plethysmograph

Table-1 Characterization of plethysmograph from the viewpoint of chaotic time series analyses

chaotic characteristic	measure	(in the case of deterministic chaos)	result on plethysmograph	
			blank & amine (upper) (lower)	
self	correlation	(noninteger)	2.61	
similarity	dimension		2.75	
orbital	Lyapunov	(positive)	+0.068	
instability	exponent		+0.079	

このことは、指尖容積脈波が少数自由度の非線形的なダイナミクスによって支配され、自己相似的な構造を伴う変動を繰り返し、軌道不安定な時系列変化を生じていることを示唆している。そして、観測した指尖容積脈波の時系列データより再構成したアトラクタの自己相似構造の幾何学的および力学的な定量値である相関次元およびリアプノフ指数が、指尖容積脈波の時系列データの解析に利用可能になる。実際に匂いを嗅いだ時に、その種類や人によって指尖容積脈波の時間的な変化は多少なりとも異なる傾向を示した。そこでこれらのカオスの特性値によって、人の情動の生理心理反応を定量的に捉えることが期待される。

3.2 相関次元解析法の検討

1回の相関次元の計算を行うための最適な時間範囲を検討した結果を **Fig.-3** に示す。

図は数値微分により求めた $\text{Slope}(\log C^n(r)/\log(r))$ vs $\log(r)$ の関係を示している。20秒間の条件では $\log(r)$ に対してほぼ一定の Slope を示し、信頼性の高い相関次元を求めることができた。このことは、指尖容積脈波は20秒位ずつの定常性を維持しながら変動することを示唆している。

相関次元を求める Grassberger-Procaccia の相関積分法は、脳波のような実験データではそのデータ数、時間ずらし、サンプリング時間およびノイズなどによって相関次元が全く異なったり、信頼性が乏しいことが報告されている¹¹⁾。本解析では Grassberger-Procaccia の相関積分法において、埋め込み次元に対して時間遅れを変化させる Rapp らの方法を用いて¹²⁾、**Fig.-3** に示すような比較的信頼性の高い相関次元を得るこ

Fig.-3 Effect of the time range on correlation dimension

とを可能にした。

その条件で、匂いを嗅いだ時の相関次元の経時変動の1例を **Fig.-4** に示す。

レモンを嗅いでいる時とトリエチルアミンを嗅いでいる時の両者の間には、相関次元のレベルの違いが認められ、被験者9名中8名でトリエチルアミンが高い傾向を示した。この結果、匂いによ

って相関次元が異なる可能性が示された。

3.3 嗜好別・快不快別による相関次元への影響

匂いによる心理評価の嗜好および快不快別の相関次元への影響を **Fig.-5** に示す。

嗜好別では全被験者がレモンをやや好き以上、トリエチルアミンをやや嫌い以上と評価し、嗜好

Fig.-4 Temporal changes of correlation dimension caused by odors

Fig.-5 Effects of mental states on correlation dimension

***: $P < 0.001$

別の相関次元の平均値は、嫌い>好き $\geq$ ブランクの傾向を示した。レモンのような香りに対しては好きであっても快と評価しない被験者がいた。そこでやや快以上のように5段階評価の4以上や2以下の評価を行った被験者を同一のグループとし、心理状態の快と不快のグループに分けて相関次元の平均値を比較すると、両者の間に有意な差を認めた。また、相関次元の変化(ΔD;直前のブランクに対する相関次元の差)について嗜好別と快不快別に比較すると、不快の場合は相関次元の上昇が大きく、快と不快では有意な差を認めた。この結果は相関次元が心理状態の快不快と関係することを示唆した。

3.4 嗜好別・快不快別による生理パラメータへの影響

嗜好別・快不快別のグループのその他の生理パラメータへの影響を Table-2 に示す。

匂いに対して好きと嫌いのグループ間および快と不快のグループ間で、指尖容積脈波の低周波成分 LF およびその周波数成分比 Ratio は有意な差を認めた。また、ブランクからの変化でも同様のグループ間で低周波成分 LF および GSR は有意な差を認めた。

山崎らは指尖容積脈波の周波数解析を行い、そ

の LF や Ratio が不安などの情動と関係することを示唆し^{5)~7)}、堀川らは GSR で安らぎ効果を評価している¹³⁾。

今回の匂いの実験もこれらの報告と同様に、心理の快不快に対応した生理パラメータの変化を確認した。

3.5 相関次元と心理・生理パラメータとの関係

生理パラメータと心理指標との相関関係を Table-3 に示す。

相関次元と心理評価の快不快感および生理パラメータの低周波成分 LF と周波数成分比 Ratio との間に有意な相関関係を認めた。この相関分析および先の相関次元の平均値の t-検定より、相関次元が心理状態の快不快感と関係し、心理状態の不快度を示す新しい生理指標の可能性が示唆された。

最近、佐光らは姿勢による心血管系パラメータのゆらぎへの影響を検討し、カオスの存在および姿勢により相関次元が異なることを確認した¹⁴⁾。さらに、心臓血管系のモデルシミュレーションを行い、交感神経や副交感神経などの自律神経間の複雑な非線形相互作用によって心拍リズムがカオス挙動を示し、その相関次元が変動することを推

Table-2 Effects of mental states on physiological parameters

psychological index	LF	HF	Ratio	Respiration	ΔGSR	ΔLF
agreeable vs disagreeable	*	n. s.	*	n. s.	**	*
pleasant vs unpleasant	*	n. s.	**	n. s.	*	*

** : $P < 0.01$, * : $P < 0.05$ n. s. no significance

Table-3 Relationships among psychological and physiological parameters

parameters	dimension	pleasant	likes	LF	HF	Ratio
correlation dimension	—	*	n. s.	*	n. s.	**
pleasant and unpleasant	—	**	**	**	n. s.	**
likes and dislikes	—	—	n. s.	n. s.	n. s.	**
LF	—	—	n. s.	—	n. s.	**
HF	—	—	—	—	—	**
Ratio (LF/HF)	—	—	—	—	—	—

** : $P < 0.01$, * : $P < 0.05$, n. s. no significance

察した³⁾。このことから、指尖容積脈波における相関次元も自律神経機能と密接な関係があり、トリエチルアミンのような嫌いな刺激によって不快や不安が増加し、交感神経系の働きが強まるなどのより複雑な自律神経の調節が行われ、相関次元が増加したものと考えられる。今回はカオス時系列解析法の開発と応用のために、2種類の匂いで検討を行った。今後、香りの種類を増やして検討を進めることによって、相関次元等のカオスの指標の意味とその定量性が確認できるものと考えられる。

4. 総 括

匂いによって引き起こされる人の情動の生理心理反応の評価に、カオス時系列解析法を適用した。観測した指尖容積波より得た時系列データがカオスであることを確認し、カオス特性値の一つである相関次元と心理指標および生理パラメータとの相互関係を解析した。その結果、相関次元が匂いによる人の快不快と関係があり、匂いに影響される不快の生理指標として有効であることが示唆された。

終わりに本研究のリアプノフ指数などのカオス解析に関して、有益な助言とご指導をいただきました東京理科大学基礎工学部の池口徹先生に感謝の意を表します。

引用文献

- 1) A. L. Goldberger and B. J. West, *Ann. NY. Acad. Sci.*, **504**, 195 (1987)
- 2) C. A. Skarda and W. J. Freeman, *Behavioral and Brain Sciences*, **10**(2), 161 (1987)
- 3) 佐光興亜, 横井博之, 第7回生体生理工学シンポジウム論文集, P.475 (1992)
- 4) I. Tsuda, T. Tahara and H. Iwanaga, *Int. J. Bifurcation and Chaos*, **2**, 313 (1992)
- 5) K. Yamazaki, *The Japanese Journal of Psychology*, **53**, 2, 102-106 (1982)
- 6) A. Murata, *The Japanese Journal of Ergonomics*, **28**, 206 (1992)
- 7) 中沢恒幸, *心身医*, **27**, 1, 82 (1987)
- 8) F. Takens, *Lecture Notes in Mathematics* **898**, 366, Springer (1981)
- 9) P. Grassberger and I. Procaccia, *Physica*, **9D**, 189 (1983)
- 10) M. Sano and Y. Sawada, *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 10, 1082 (1985)
- 11) 西藤聖二ら, *信学技報*, NLP 88-54, 1 (1988)
- 12) P. E. Rapp, A. M. Albano and A. I. Mees, "Dynamic Patterns in Complex Systems", p. 191 (1988) World Scientific, Singapore.
- 13) 堀川壽夫, *J. Soc. Cosmet. Chem. Japan.*, **18**, 1, 26 (1984)
- 14) 佐光興亜, 横井博之, 第6回生体生理工学シンポジウム論文集, P.381 (1991)

(1993年9月16日受理)