R-R 間隔ゆらぎのフラクタル次元解析*

—フラクタル次元に基づく MWL 評価の試み—

村田厚生**

In this paper, an attempt was made to evaluate mental workload by the fractal dimension of R-R intervals. With the increase of the work level, the evaluation on mental workload obtained by the method of paired comparison increased. In accordance with the increase of mental workload, the fractal dimension of R-R intervals increased. It was suggested that the higher the fractal dimension was, the more complicated the fluctuation of R-R intervals became. Therefore, it is concluded that the method to study the nonlinear dynamics underlying the fluctuation rhythm of R-R intervals by the fractal dimension can be used to evaluate MWL.

本研究では、精神作業負荷レベルを変化させてメンタルワークロードを増大させた場合に、R-R 間隔ゆらぎのフラクタル次元がいかに変化するかを検討した。作業負荷レベルの増加とともにメンタルワークロードが増大し、これに対応して R-R 間隔ゆらぎのフラクタル次元が高くなることが示された。すなわち、メンタルワークロードが高い状態ではフラクタル次元が高いことから、R-R 間隔のゆらぎ方がより複雑になることが示唆された。以上のように、R-R 間隔ゆらぎのフラクタル次元解析に基づくメンタルワークロードの評価の可能性が示された。

(キーワード：R-R 間隔ゆらぎ、メンタルワークロード、相関指数、フラクタル次元)

1. まえがき

心拍変動性 (Heart Rate Variability: HRV) 指標に基づくメンタルワークロード (Mental Workload: MWL) の評価が、統計解析やスペクトル解析の観点から試みられている。たとえば、村田¹⁾や Mulder²⁾は、統計的 HRV 指標に基づいて精神的作業負荷によって誘発される MWL の評価を試み、解析対象区間における R-R 間隔時系列のピーク波とトラフ波の総和が有効であることを明らかにした。また、Cerutti³⁾や Murata⁴⁾は、R-R 間隔の自己回帰モデルによるスペクトル解析結果より得られたパワースペクトルの高周波成分に対する低周波成分のパワーの比率が、MWL の評価に有用であることを報告した。しかし、これまで R-R 間隔ゆらぎのリズムにある非線形ダイナミクス (nonlinear dynamics) に関する解析はほ

とんど行われていない。

生体は中枢神経系を中心とした非常に高度な情報処理システムであり、その種々の機能はほとんどが非線形性を有すると考えられている。神経系における引き込み振動やカオス振動など、生体における種々の非線形現象が指摘されている⁵⁻⁸⁾。生体システムを非線形システムとしてモデル化する場合には、システムのダイナミクスを記述するのに必要な自由度、すなわち次元の数が問題になる。

カオス現象における自由度 (次元数) はフラクタル次元とよばれ、近年、種々の生体情報のフラクタル次元が計算されている⁹⁻¹¹⁾。EEG に関しては、 α 波と β 波のフラクタル次元はそれぞれ約 3.33 と約 5.52 であり、両者が重畳している場合には、フラクタル次元はこれらの中間の値をとることが示されている⁹⁾。また、神経膜のカオス振動および脳磁界の α 波のフラクタル次元は、それぞれ 1.7 および 4.7 程度であることが指摘された¹⁰⁾。

近年、脳波や心電図波形などの生理指標のゆらぎのリズムが複雑になると、フラクタル次元が高くなると

* 平成 5 年 7 月 21 日受付

** 広島市立大学 情報科学部

Faculty of Information Science, Hiroshima City Univ.

いう結果が示されている^{6,12)}。Rapp ら⁶⁾は、安静時と作業負荷時の脳波のフラクタル次元を比較し、作業負荷時のほうがフラクタル次元が高いことを示した。また、Ravelli ら¹²⁾は、心電図波形そのものを対象として、正常時と心室性期外収縮、心室細動が発生した際のフラクタル次元を計算し、正常時のほうが次元が低いことを報告した。これらの結果と同様に、精神作業負荷などのストレス加えられ、ストレス状態が誘発された場合には、R-R 間隔のフラクタル次元が高くなるのではないかと推測される。

本論文では、フラクタル次元に基づく MWL 評価の試みとして、精神作業負荷レベルを変えて MWL を変化させたとき、これに応じて R-R 間隔のゆらぎのフラクタル次元がいかに変化するかを確認する。すなわち、より大きな MWL が誘発されたときに R-R 間隔のゆらぎ方が複雑になるかどうかを、フラクタル次元解析に基づいて検討し、R-R 間隔のフラクタル次元解析による MWL の評価を試みる。

2. 実験方法

2-1. 実験課題

実験課題としては、2つの数値の加算作業（暗算）を用いた。パーソナルコンピュータ（PC 9801 DA 2）を用いて、CRT ディスプレイ上に問題を提示し、キーボードより計算結果を入力させた。作業負荷レベルとして数値の桁数（1桁、2桁、3桁、4桁）を用い、精神的な作業負担感が変化するようにした。以下では、1～4桁の加算作業をそれぞれ A1、A2、A3、A4とよぶことにする。各加算作業の実施順序は被験者ごとにランダム化し、各作業をそれぞれ5分間ずつ実施させた。エラーの有無、1問当たりの処理時間をパーソナルコンピュータによって測定し、5分間の回答数、正解率、1問当たりの平均処理時間を求めた。1問当たりの処理時間は、割り込みを用いてインタバルタイマを設定することにより、10 msec の精度で計測した。

2-2. メンタルワークロードの心理評価

Scheffe の一対比較法によって、A1～A4の課題の MWL の主観評価を実施した。A_i、A_jの順にそれぞれ約15秒間、課題を遂行する。（A_i、A_j）に対して、A_iを基準として A_jの負担感を-2：負担が非常に小さい、-1：負担が小さい、0：負担に差がない、1：負担が大きい、2：負担が非常に大きい5つのカテゴリに基づいて評価させた。同様の評価を（A_j、A_i）の組み合わせについても行い、総計12通りの組み合わせ

でこのような評価を実施した。被験者は19～24歳の男子大学生5名である。以上の実験に基づいて MWL の主観評価値を求め、あわせて順序効果、組み合わせ効果の分析も実施した。

2-3. 実験

実験では、脳波計 EEG 1 A 93（日本電気三栄製）によって心電図（V₅の位置より誘導）を、各課題ともに5分間連続して測定した。ECG データは PCM データレコーダ RD 111 T（TEAC 製）に記録し、実験終了後に A/D 変換器 ADX 98 E（カノーブス電子製）を用いてパーソナルコンピュータ PC 9801 DA 2 に転送し、R-R 間隔を求めた。また、実験開始前にも座位で5分間の安静データの記録を実施した。被験者は19～24歳の男子大学生13名である。実験室内の温度、湿度は約25°C、50%で、パソコンのキーボード上の水平面照度は400 lxであった。

3. R-R 間隔ゆらぎのフラクタル次元の計算

一般に、時系列信号 $R(t)$ によって構成されるシステムの n 次元相空間中での軌道を再構成するためには、次式をプロットして、その挙動を観察する。

$$\{R(t), R'(t), \dots, R^{(n-1)}(t)\} \quad (1)$$

この軌道の落ちつく先の状態がアトラクタに対応する。 R' 、 $R^{(n-1)}$ は、それぞれ時間 t に関する1階と $n-1$ 階の微分を表す。 $R(t)$ を微分する操作は非常に複雑になるため、この代わりに一定の時間遅れを τ として次式を用いる。

$$\{R(t), R(t+\tau), \dots, R(t+(n-1)\tau)\} \quad (2)$$

ここで n を十分大きくとれば式(2)は式(1)とほぼ同等の軌道を描き、本来のアトラクタと本質的に同じ性質を有すること¹³⁾が知られているため、式(1)の代わりに式(2)によって n 次元相空間中での軌道を再構成できる。以上のように相空間における軌道を描き、アトラクタの次元を求めていく。このアトラクタの次元によってシステム自体のダイナミクス、すなわち自由度が推定できる。アトラクタの次元が非整数になる場合のアトラクタはストレンジアトラクタとよばれ、非周期的な性質をもちながら、ある決定論的なダイナミクスに従う。これが一般にカオス現象とよばれるものである。

以下にフラクタル次元の誘導方法について述べる。次のような生体情報の時系列信号が得られているとする。

$$\{R(t_1), R(t_2), \dots, R(t_i), \dots\} \quad (3)$$

式(3)に基づいて n 次元相空間へデータ総数 N 個のデータをプロットするために、次のベクトル R_i を考える。

$$R_i = \{R(t_i), R(t_i + \tau), \dots, R(t_i + (n-1)\tau)\} \quad (4)$$

ここで、 $i=1, \dots, N$ で、 Δt を生体情報のサンプリング間隔とすれば、 $t_k = k \cdot \Delta t$ 、 $\tau = m \cdot \Delta t$ となる。また、 m の値はフラクタル次元の計算に際して固定しておく。 τ の値があまりにも大きすぎれば、データ間の相関性が小さくなり、 τ の値が小さすぎる場合には相空間に構成されるアトラクタは直線状になり、どちらの場合にも本来のアトラクタの特徴を把握できなくなる。一般には $m=2 \sim 4$ の値が選ばれることが多い¹⁰⁾。ある基準点 R_k を選んで、残りの $(N-1)$ 個の点 (ベクトル) に対して、 R_k からそれぞれの点までの (ユークリッド) 距離を計算する。そして、基準点 R_k からある一定の距離 r 以内にある点の数を数え、すべての k について集計し、これを N^2 で割ることによって相関積分 $C_n(r)$ を求める。ここで N は最低でも数百ポイント選ぶ必要があり、式(4)で表されるベクトルの集合をつくるには $N + m(n-1)$ 個のデータが必要になる。 $C_n(r)$ に次のような関係が成立する場合に、アトラクタの相関指数が d となる。

$$C_n(r) = k_0 \cdot r^d \quad (5)$$

k_0 は定数である。式(5)の両辺の対数をとれば

$$\log_{10} C_n(r) = \log_{10} k_0 + d \cdot \log_{10} r \quad (6)$$

となり、式(6)の傾きとしてアトラクタの相関指数 d を求めることができる。フラクタル次元は、相空間の次元 n を変化させたときの相関指数 d を求め、 n の増加とともに d が飽和した値 d_s として求められる。

R-R 間隔の等間隔時系列は、R-R 間隔をその出現順に番号をつけて並べることによって構成した。すなわち、1 拍をサンプリング間隔 Δt とみなした。また、 $m=2$ 、 $n=2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15$ として計算を実施した。最小値を 0、最大値を 1 として R-R 間隔の値を線形変換し、0~1 の数値に規格化した。各 n の値で r の初期値を変えて、 $\log r$ と $\log C_n(r)$ の関係を求めた。 r の刻み幅はいずれの n についても 0.02 とした。以上のようにして式(6)から相関指数 d を求めた。Ruelle¹⁴⁾ が指摘するように、 d を求める際には対象とする r の範囲の最大値と最小値をそれぞれ r_1 と r_2 として $r_2 \geq r_1$ となるようにした。各 n ごとに適した r_1 と r_2 を求めて、相関指数 d を計算した。また、Ruelle¹⁴⁾ の指摘した次の条件が満たされているかどうかチェックした。

$$d \leq \log_{10} N^2 \quad (7)$$

本論文の N はほぼ 380~440 の範囲におさまる。

4. 結果および考察

Scheffe の一対比較法による作業課題 A1~A4 に対する MWL (心理的負担感) の評価結果を図 1 に示す。一対比較データの分散分析を実施した結果、主効果 (負担感) (F 値: 158.6, $p < 0.01$) のみ有意で、組み合わせ効果 (F 値: 2.067) と順序効果 (F 値: 0.333) に関しては有意差は認められなかった。図 1 より、作業負担レベルの増加とともに MWL の主観評価値が大きくなる傾向が観察される。

平均正解率、平均回答数、平均処理時間を実験条件 A1~A4 で比較した結果をそれぞれ表 1、表 2、表 3 に示す。作業負担レベルの増加とともに 1 問当たりの平均処理時間が増加し、平均正解率および平均回答数が減少したことから、本実験の作業課題がパフォーマンスへ顕著な影響を及ぼしたことがうかがわれる。

平均値の差の検定 (Welch の t 検定) の結果、以下の組み合わせで有意差が認められた。

平均正解率

(A1, A2) ($t=4.269 > t(0.01, 17)$)

(A1, A3) ($t=3.396 > t(0.01, 13)$)

(A1, A4) ($t=4.122 > t(0.01, 13)$)

(A2, A4) ($t=3.133 > t(0.01, 13)$)

平均処理時間

(A1, A2) ($|t|=7.847 > t(0.01, 13)$)

(A1, A3) ($|t|=9.472 > t(0.01, 13)$)

(A1, A4) ($|t|=6.869 > t(0.01, 13)$)

(A2, A3) ($|t|=4.897 > t(0.01, 18)$)

図 1 Scheffe の一対比較法による実験条件 A1~A4 に対する MWL の心理評価値

Fig. 1 Mental workload value for each experimental condition A1-A4 obtained by the method of paired comparison.

表1 作業負荷レベルの間での平均正解率の比較

Tab.1 Comparison of mean percent correct among work levels.

work level	mean	SD
A 1	0.980835	0.0178
A 2	0.929112	0.038
A 3	0.847794	0.135
A 4	0.754326	0.19

表2 作業負荷レベルの間での平均回答数の比較

Tab.2 Comparison of mean number of answers among work levels.

work level	mean	SD
A 1	213.538	42.96
A 2	68.23	19
A 3	36.23	12.02
A 4	22.84	7.79

表3 作業負荷レベルの間での平均処理時間の比較

Tab.3 Comparison of mean processing time among work levels.

work level	mean	SD
A 1	1.5	0.371
A 2	4.952863	1.478
A 3	9.607302	2.94
A 4	16.296953	7.45

図2 相空間の次元と相関指数の関係 (被験者 MD の安静と A 4)

Fig.2 Dependency of correlation exponent on the dimension of phase space (rest and A4: Subject MD).

(A 2, A 4) ($|t|=5.172 > t(0.01, 13)$)

(A 3, A 4) ($|t|=2.892 > t(0.01, 16)$)

平均回答数

(A 1, A 2) ($t=10.717 > t(0.01, 17)$)

(A 1, A 3) ($t=13.77 > t(0.01, 14)$)

(A 1, A 4) ($t=15.13 > t(0.01, 13)$)

(A 2, A 3) ($t=4.93 > t(0.01, 21)$)

(A 2, A 4) ($t=7.656 > t(0.01, 16)$)

(A 3, A 4) ($t=3.236 > t(0.01, 21)$)

以上より、本実験の作業負荷 A 1~A 4 によって異なるメンタルワークロードが誘発され、作業負荷レベルの増加とともに MWL が増大することが示された。

図 2、図 3 に、それぞれ被験者 MD と OD に対する安静条件と A 4 での相空間の次元 n と相関指数 d の関係を示す。相空間の次元 n が大きくなるにつれて相関指数も増加するが、 n が 8 もしくは 9 以上では、値がほぼ飽和している。ここでは $n=8$ もしくは 9 以上の相関次元の平均を求め、これをフラクタル次元 d_s とした。これらの図から、安静状態よりも A 4 のほうが d_s が高いことがわかる。

各実験条件でのフラクタル、次元 d_s の平均値 ($\pm$ SD) を比較した結果を、5 分間の R-R 間隔の個数の平均値とともに図 4 に示す。すべてのケースで式(7)の条件は満たされた。被験者全体の平均値の差の検定の結果、

安静条件と A 1 ($|t|=2.266 > t(0.05, 23)$)

安静条件と A 2 ($|t|=4.463 > t(0.01, 24)$)

安静条件と A 3 ($|t|=4.913 > t(0.01, 24)$)

安静条件と A 4 ($|t|=6.991 > t(0.01, 21)$)

の間で有意差が認められた。安静条件よりも精神作業

図3 相空間の次元と相関指数の関係 (被験者 OD の安静と A 4)

Fig.3 Dependency of correlation exponent on the dimension of phase space (rest and A4: Subject OD).

図4 実験条件間でのR-R間隔ゆらぎのフラクタル次元の比較

Fig. 4 Comparison of fractal dimension in R-R interval fluctuation among experimental conditions (rest : $n=401.01$, A1 : $n=419.76$, A2 : $n=414.92$, A3 : $n=407.53$, A4 : $n=401.92$).

時のほうが d_s は高い値を示し、また、作業負荷レベルが高いほど d_s も高くなる傾向が認められた。前述のとおり作業負荷レベルの増加とともにMWLの増大が示されており、高いストレス状態ではフラクタル次元も高くなることが明らかになった。すなわち、MWLが大きいストレス状態ではフラクタル次元が高いことからR-R間隔のゆらぎ方が複雑になり、このゆらぎをモデル化するためにより多くの自由度が必要になると考えられる。以上より、より高いストレス状態ではR-R間隔のゆらぎ方が複雑になることが示唆された。R-R間隔ゆらぎのフラクタル次元はTP^{1,2)}やLH^{3,4)}と同様にMWLの評価に有用であると考えられる。

5. 結 論

本論文では、精神作業時のR-R間隔のゆらぎ現象におけるフラクタル次元解析を実施し、メンタルワークロードの増大に伴ってフラクタル次元が増加し、R-R間隔のゆらぎ方が複雑になることが示唆された。

参考文献

- 1) 村田厚生：心拍変動性指標によるメンタルワークロードの評価，人間工学，28(2)，91～98，1992。
- 2) G. Mulder and L. J. M. Mulder：Information processing and cardiovascular control, Psychophysiology, 18(4)，392～402，1981。
- 3) C. Cerutti, G. Fortis, D. Libeat, G. Baselli and

- S. Civardi：Power spectrum analysis of heart rate during mental arithmetic task, Journal of Ambulatory Monitoring, 1(3)，241～250，1988。
- 4) A. Murata：Experimental discussion on measurement of mental workload—Evaluation of mental workload by HRV measures—, IEICE Transaction of Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E77-A(2)，409～416，1994。
- 5) K. Aihara, T. Numajiri, G. Matsumoto and M. Kotani：Structures of attractors in periodically forced neural oscillators, Physics Letter, A, 116, 313～317，1986。
- 6) P. E. Rapp, T. R. Bashore, J. M. Martinerie, A. M. Albano, I. D. Zimmerman and A. I. Mees：Dynamics of brain electrical activity, Brain Topology, 2(1)，99～118，1989。
- 7) A. Babloyantz：Evidence of chaotic dynamics of brain activity during sleep cycle. In C. Mayer-Kress(ed.), Dimension and Entropies in Chaotic Systems, Springer-Verlag, Berlin, 241～245，1986。
- 8) A. Babloyantz and A. Destexhe：Is normal heart a periodic oscillator?, Biological Cybernetics, 58, 203～211，1988。
- 9) 品川嘉也，松田裕之，河野貴美子：脳波のフラクタル次元解析，生物物理，29(suppl.)，S 266，1988。
- 10) 石橋秋彦，合原一幸，小谷 誠：脳・神経系のカオスとそのフラクタル次元解析，医用電子と生体工学，26(1)，57～61，1988。
- 11) S. P. Layne, G. Mayer-Kress and J. Holzfuss：Problems associated with dimensional analysis of electroencephalogram data. In C. Mayer-Kress(ed.), Dimension and Entropies in Chaotic Systems, Springer-Verlag, Berlin, 246～256，1986。
- 12) F. Ravelli and R. Antolini：Complex dynamics underlying the human electrocardiogram, Biological Cybernetics, 65, 57～65，1992。
- 13) F. Takens：Detecting strange attractors in turbulence. In D. A. Read and S. Young(eds.), Dynamical Systems and Turbulence, Lecture Notes in Mathematics, 898, 366～381，1981。
- 14) D. Ruelle：Deterministic chaos：the science and the fiction, Proc. Royal Society London, A, 427, 241～248，1990。