

1/f ゆらぎパワーをもつ生体刺激量の統計測定

藤原 修, 柘植 洋人

電気情報工学科

(1996年8月16日受理)

Statistical Measurement of Biostimulation with 1/f Fluctuation Power

Osamu FUJIWARA and Hiroto TSUGE

Department of Electrical and Computer Engineering

(Received August 16, 1996)

It is well recognized that the physical stimulation, like illumination, music, soft winds and environmental variables having 1/f fluctuation power spectra, relaxes a person, though the existence of this effect is not being scientifically proved. Since the 1/f like fluctuation can theoretically give numberless waveform in the time domain, we think that all the waveform with 1/f power spectral characteristics, cannot always cause comfortable biostimulation. As a first step in examining what kinds of biostimulation waveform give relaxation to a person, we statistically measure brightness fluctuation of candle flame that is said to cause a sedative effect. The experimental findings show that the flame brightness has the peak crossing rate of 0.1 to 0.4 Hz, fluctuating with the rhythm close to person's blood pressure (0.1 Hz) and breathing (0.26-0.33 Hz).

1. まえがき

1/f ゆらぎとはパワースペクトルが周波数 f の逆数に比例するようなゆらぎを指す。そよ風の強さ、鳥のさえずり、星の瞬き、などは 1/f ゆらぎであり、同特性をもつ物理量は自然界には数多く存在することが報告されている^{1),2)}。心拍のリズム³⁾やニューロンの活動⁴⁾などは生体でみられる 1/f ゆらぎ⁵⁾である。この種のゆらぎはヒトにとって心地よいリズムであることが既にわかっており、例えば、ろうそくの炎は 1/f ゆらぎを有するとされ、これと同じ発光強度を交流100Vの点灯電球にもたせた結果、その照明環境においてろうそくの場合と同じくヒトの心拍の減少がみられたという⁶⁾。しかしながら、1/f ゆらぎの物理的刺激がどういう作用機序でヒトに快適な環境をもたらすか、どのような刺激波形が鎮静効果を引き起こすのか、などについては一切不明である。

本論文では、1/f ゆらぎパワーをもつ生体刺激の作用機序解明を目的とし、ヒトに鎮静効果を及ぼすとされるろうそくの炎を生体刺激量に取り上げ、この時間領域と周波数領域における統計測定を行うことで、ゆらぎ波形の統計量とスペクトルパラメータとの関係を調べた。な

お、ゆらぎの波形測定には、環境電磁工学 (Electromagnetic Compatibility: EMC) の分野において電磁ノイズの時間領域測定⁷⁾に頻用されている交差率分布 (Crossing Rate Distribution: CRD) と振幅確率分布 (Amplitude Probability Distribution: APD) を用いた。CRD はノイズの位相情報、APD はノイズの振幅情報を捉えるものとして知られ、これらは、従来より雷などの自然電磁ノイズや人工電磁ノイズの時間領域での有効な波形測定法として既に確立している。

2. 統計測定

図1は測定回路構成を示す。木製風防内 (45×50×55cm) のろうそくの炎をフォトダイオード (ピーク感度波長: 850nm) で電圧変化として取り出し、これを増幅器 (シャ断周波数: 141Hz) : A/D 変換器 (8bit) を介して計算機に取り込む。炎の光強度は、パワースペクトル、交差率分布 (CRD)、振幅確率密度分布 (APD) で評価する。

一般に、パワースペクトルはゆらぎパワーの周波数特性を表すもので、観測時間 T の波形 $x(t)$ のパワースペクトル

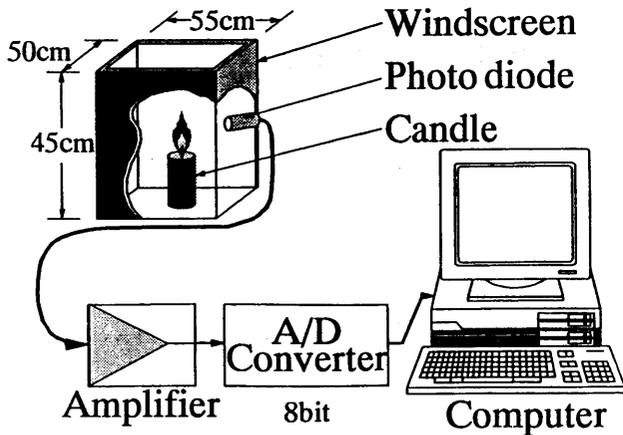


Figure 1 Experimental setup for measuring brightness of candle flame.

Table 1 Dimensions of candles used in our experiment.

| Candle(Type) | Diameter | Core Diameter |
|--------------|----------|---------------|
| A | 15mm | 2mm |
| A | 20mm | 2mm |
| A | 26mm | 2mm |
| B | 17mm | 2mm |
| C | 34mm | 2mm |
| C | 39mm | 2mm |
| D | 50mm | 2mm |
| E | 75mm | 2mm |

$S(f)$ は,

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt \right|^2 \quad (1)$$

と与えられる。式(1)の計算に際しては、少ないデータでも分解能が良いとされる最大エントロピー法⁹⁾を用いた。CRDとは、ゆらぎ波形が単位時間内で一定のレベルを正の方向に切る回数と定義され、ゆらぎの位相情報を与える。観測時間 T の波形 $x(t)$ の交差率分布 CRD は、

$$CRD(\xi) = \frac{n(\xi)}{T} \quad (2)$$

と与えられる⁹⁾。ここで、 $n(\xi)$ は x が ξ を T 内で正の方向に横切る回数である。APDとは、ゆらぎ波形の振幅が一定のレベルを越える確率で定義され、ゆらぎの振幅情報を与える。観測時間 T の波形 $x(t)$ の振幅確率分布 APD は、

$$APD(\xi) = \frac{1}{T} \sum_k \tau_k \quad (3)$$

と与えられる⁹⁾。ここで、 τ_k ($k=1,2,3,\dots$) は T 内で x が k 番目にレベル ξ を越えている時間である。

実験試料を表1に示す。ろうそくは円柱状の市販品で、芯の太さ(2mm)はすべて同じであるが、直径が15mm~75mmの8種類のものを用いた。なお、表中のタイプA~Eはろうそくの製造会社に対応して名付けている。どのろうそくもほぼ同じ大きさの炎で燃焼するが、その成分や周囲温度によって炎のゆらぎが異なる。実験は、ろうそくの炎を灯し、それが十分に安定したと思われる状態に達してからろうそくの炎以外の光が入らないように、シャ光して行った。炎の光強度は、フォトダイオード出力を増幅した後、A/D変換器(サンプリング周波数:10Hz)で1024個の離散データを取り込み、これを30回繰り返した。それ故に、観測時間 T は $0.1[s] \times 1024 \times 30 = 3072[s]$ (約50分)となり、周波数スペクトルの有効

な低域周波数は $3072^{-1} = 0.00033\text{Hz}$ 、高域周波数は $10/2 = 5\text{Hz}$ となる。なお、ろうそくの発光強度の測定に際しては、数Hz~1kHzのサンプリング周波数で予備的にデータを取得し、ゆらぎの周波数範囲を事前に調べた。その結果、安定燃焼させたろうそくの炎ゆらぎの高域周波数は2~3Hzまでを考えれば十分であること、低域周波数は0.001Hz程度であればフラットになる周波数スペクトルをカバーできること、などが判明し、筆者らの実験装置のメモリー容量を考慮してサンプリング周波数は10Hzとした。

3. 結果と考察

光強度データの結果の一例を図2に示す。上図と中図は同じろうそく(タイプA)の光強度の観測波形を示す。但し、縦軸は光強度の平均値を基準(ゼロ)にした相対値(実効値で規格)で示してある。同じろうそくでも、燃焼の具合によっては上図のように光強度に周期性が現れたり、中図のように全くランダムになったりする。図の下図は光強度のパワースペクトルを示す。縦軸は平均パワーで規格化したパワースペクトル[s]、横軸は周波数[Hz]である。0.1Hz以下のスペクトルはほぼ $1/f$ に近いが、それ以上の周波数領域においては同じろうそくでも傾きが異なっている。すなわち、0.1Hz以上の周波数スペクトルは光強度に周期性がみられるときは $1/f^2$ 、そうでないときは $1/f$ 特性に近づくことがわかる。この傾向は他のタイプのろうそくにおいても観測された。その例を図3(タイプB)、図4(タイプC)に示す。タイプBの光強度は細かい周期性がみられるものの、全体としては強い周期性はみられないので、パワースペクトルは1Hzまでは $1/f$ 型であるが、それ以上の周波数では $1/f^2$ 型に移行している。タイプCの光強度は緩やかな周期性がみられるので、パワースペクトルも $1/f^2$ 型になっている。

図5は実験に用いたすべてのろうそくの光強度に対するパワースペクトルを重ねて示す。図によれば、ろうそくの光強度のパワースペクトルは0.001Hz以下の周波数では

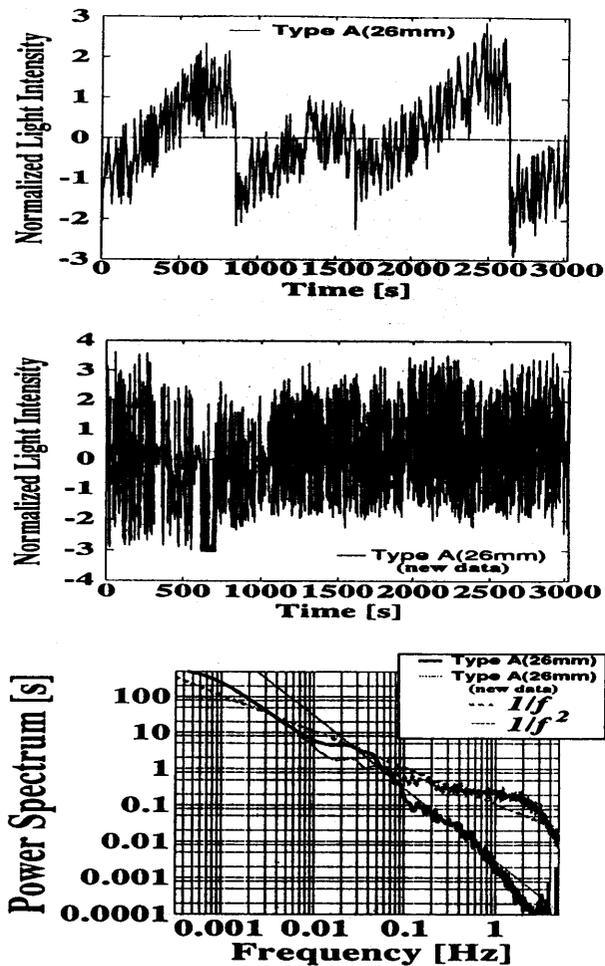


Figure 2 Time-domain waveform and power spectrum measured for flame brightness of A-type candle.

一定であり、それ以上の周波数においては $1/f^{(1-2)}$ であるが、0.1Hzより低い周波数ではろうそくの直径、成分などによらずパワースペクトルはいずれも $1/f$ 特性に近づいていること、2~3Hz以上の周波数でのパワースペクトルはいずれも $1/f^\beta$ ($\beta \geq 2$) 型に移行していること、などがわかる。

図6はタイプAのろうそくに対する102.4秒毎のCRDの時間推移を示す。上図と下図は図2の上図と中図のゆらぎ波形に対応したCDRであり、これらの図から、ゆらぎに周期性がみられる場合はCRDは著しく変動していること、周期性がない場合にはCRDのピークや形状は大きくは変化していないこと、などがわかる。実験に用いたすべてのろうそくの光強度に対する全観測時間(3072秒)のCRDとAPDを図7、図8にそれぞれ示す。CRDはろうそくの太さに応じた特徴ある分布が得られ、炎は0.1~0.8Hzの期待周波数でゆらいでいることがわかる。また、APDはろうそくの太さやタイプに拘わらずほとんど同じ分布となっており、これから炎の規格化光強度はほぼ同じ正規分布にしたがってゆらいでいるこ

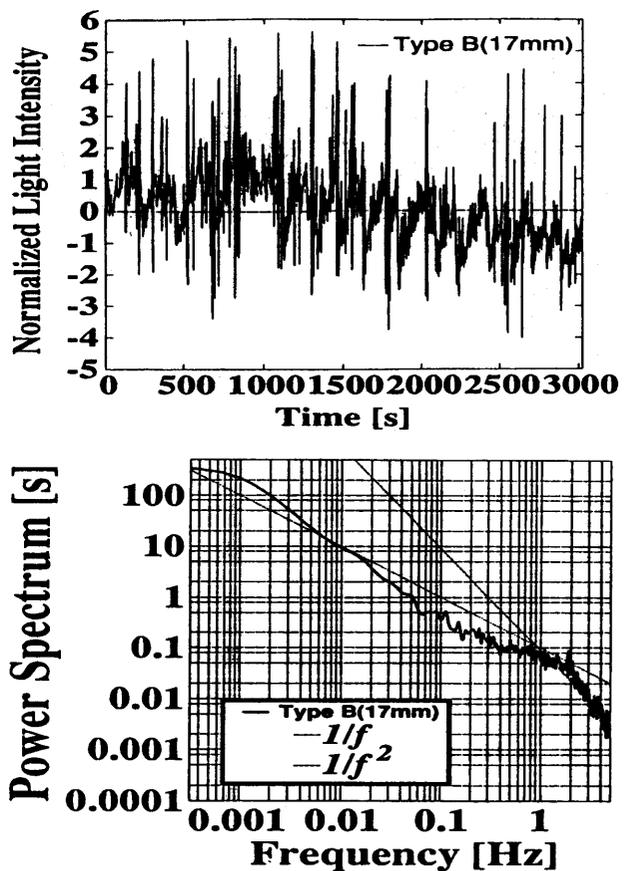


Figure 3 Time-domain waveform and power spectrum measured for flame brightness of B-type candle.

とがわかる。

つぎに、周波数領域でのスペクトルパラメータと時間領域における波形パラメータとの関係⁹⁾について考察する。直流分を除いたゆらぎ波形 $x(t)$ のパワースペクトルを $S(f)$ としたとき、波形のもつ統計量とスペクトルパラメータとの関係を求める。いま、ゆらぎ波形がガウス分布にしたがって変動するものと仮定する。そのとき、波形の平均パワを ϕ とすれば、パーセバルの定理から、 ϕ と振幅平均との間には

$$\phi = \int_0^\infty S(f)df = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_k \frac{x(t_k)^2}{N} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt \quad (4)$$

という関係式が成り立つ。一方、CRDとAPDは、

$$\begin{aligned} \text{CRD}(\xi) &= \sqrt{\frac{1}{\phi} \int_0^\infty f^2 S(f) df} \cdot \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\phi}\right), \\ \text{APD}(\xi) &= \int_\xi^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\phi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\phi}\right) dx \end{aligned} \quad (5)$$

と表される¹⁰⁾。 $S(f)$ として、図9に示すスペクトルモデル ($\alpha < \beta$) を考えれば、 ϕ とCRDは、

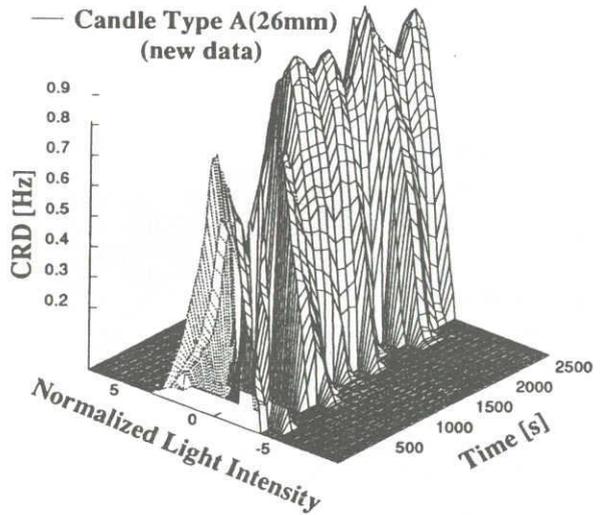
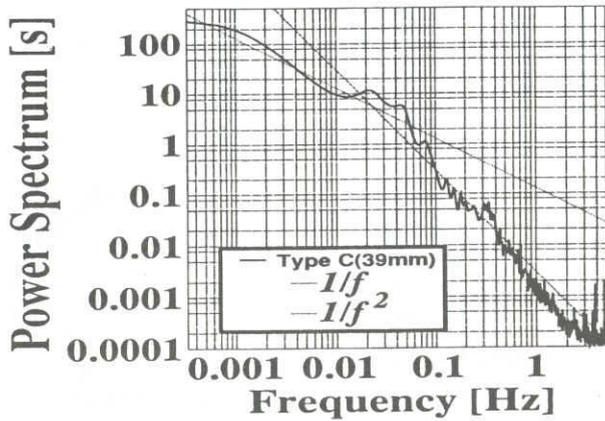
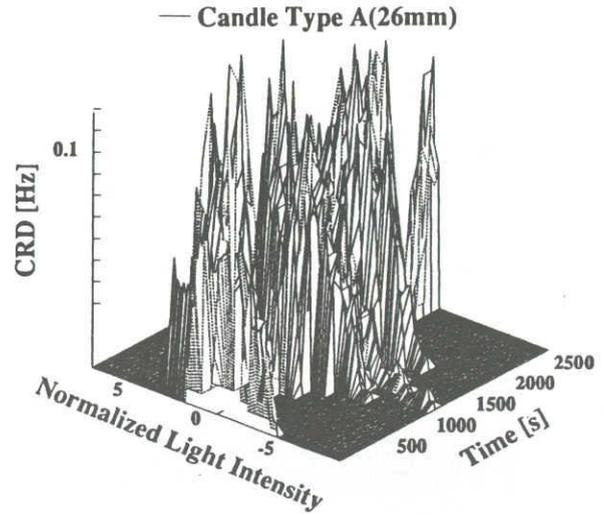
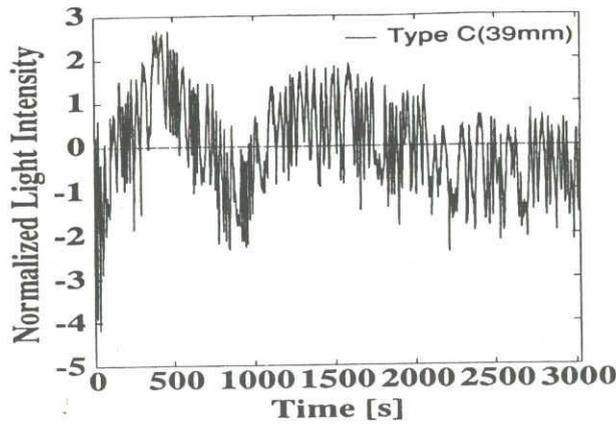


Figure 4 Time-domain waveform and power spectrum measured for flame brightness of C-type candle.

Figure 6 Time transition of CRD measured for flame fluctuation of candles.

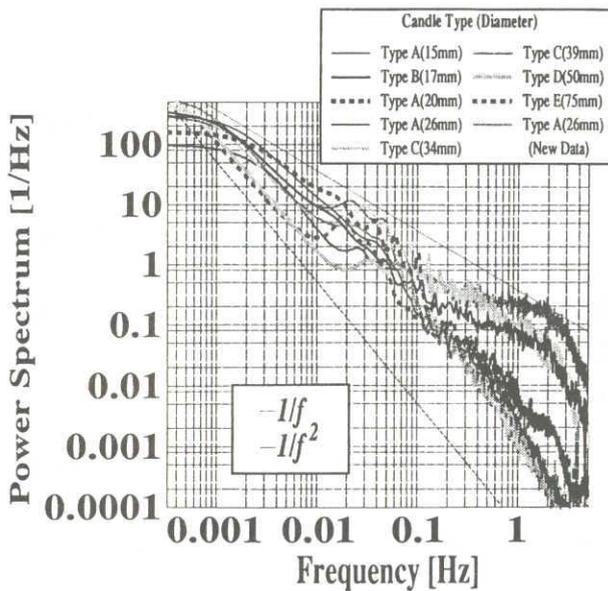


Figure 5 Power spectra for flame fluctuation of all the candles used in our experiment.

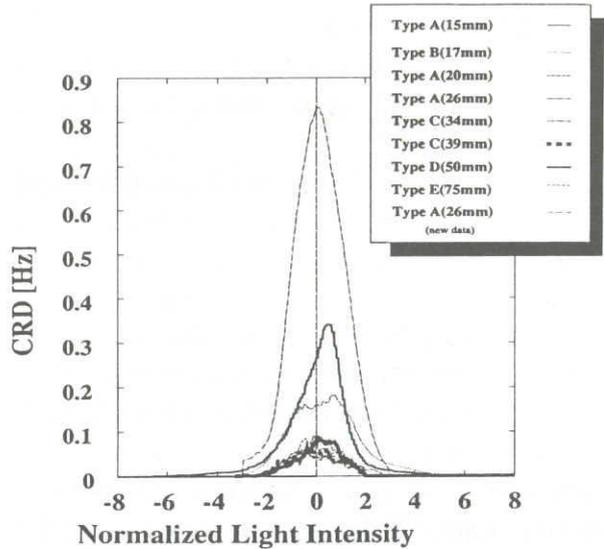


Figure 7 CRDs measured for flame fluctuation of all the candles used in our experiment.

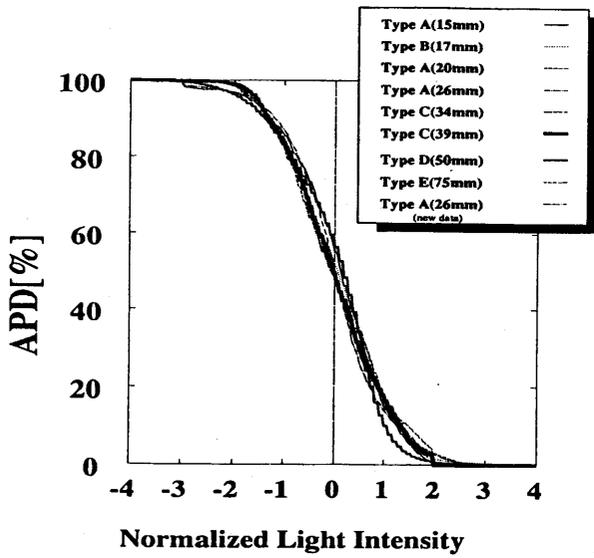


Figure 8 APDs measured for flame fluctuation of all the candles used in our experiment.

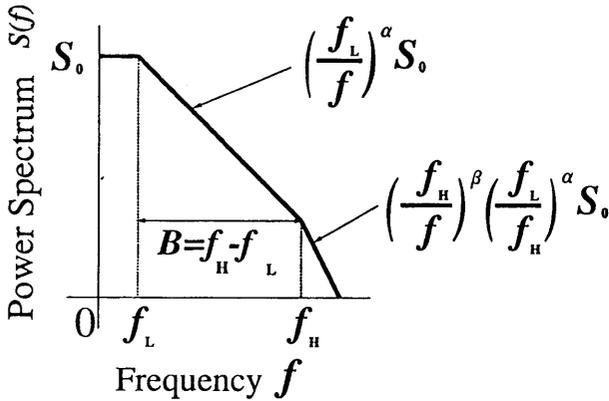


Figure 9 Power spectral model assumed for fluctuation waveform.

$$\phi = \left(\frac{f_L}{B}\right)^\alpha \left[\left(\frac{f_L}{B}\right)^{1-\alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \left\{ \left(1 + \frac{f_L}{B}\right)^{3-\alpha} - \left(\frac{f_L}{B}\right)^{1-\alpha} \right\} + \frac{1}{\beta-1} \left(1 + \frac{f_L}{B}\right)^{1-\alpha} \right] \times BS_0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{CRD}(\xi) = & B \cdot \left[\frac{1}{3} \left(\frac{f_L}{B}\right)^{3-\alpha} + \frac{1}{3-\alpha} \left\{ \left(1 + \frac{f_L}{B}\right)^{3-\alpha} - \left(\frac{f_L}{B}\right)^{3-\alpha} \right\} + \frac{1}{\beta-1} \left(\frac{f_L}{B}\right)^\beta \left(1 + \frac{f_L}{B}\right)^{3-\alpha-\beta} \right]^{0.5} \\ & \times \left[\left(\frac{f_L}{B}\right)^{1-\alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \left\{ \left(1 + \frac{f_L}{B}\right)^{1-\alpha} - \left(\frac{f_L}{B}\right)^{1-\alpha} \right\} + \frac{1}{\beta-1} \left(1 + \frac{f_L}{B}\right)^{1-\alpha} \right]^{-0.5} \times \exp\left(\frac{\xi^2}{2\phi}\right) \quad (7) \end{aligned}$$

で与えられる。

図10は、スペクトル傾斜 α とCRDピーク値との関係を示す。但し、CRDのピーク値はろうそくの炎の光強度の全観測時間30720データを1024データごと順にずら

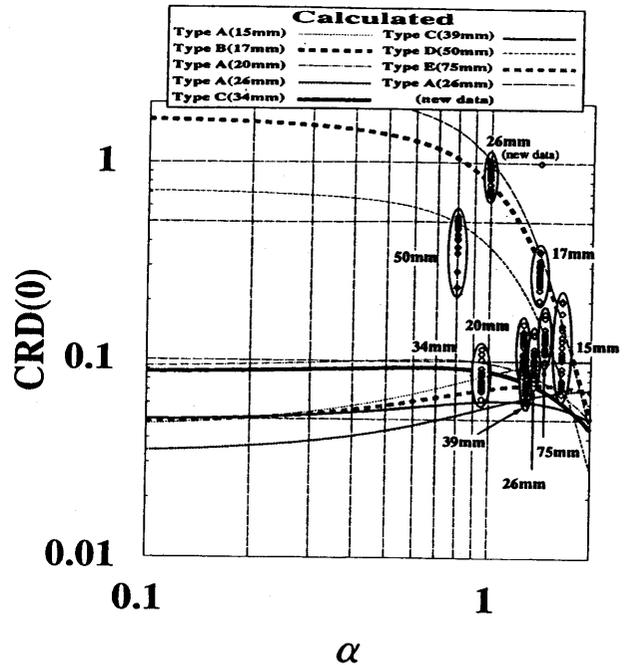


Fig.10 Quantitative relationships between power spectral slope α and peak crossing rate CRD(0).

しながら求めた。縦軸はCDRピーク値CRD(0)、横軸はパワースペクトルの傾き α を取っている。図中の実践と点線は式(7)の計算値である。但し、計算に際してのパラメータは図9のスペクトルモデルを図5のパワースペクトルに当てはめて求めた。図より、 α が0.8~1.6の範囲にあり、そのときのCRDピーク値は0.08~0.8Hzにばらついてはいるが、0.1~0.4Hzに集中していること、などがわかる。一方、ヒトには超低周波の概日リズム(1.16×10⁻⁵Hz:25時間周期)から高周波の脳波(0.5~30Hz)にわたる生体リズム¹¹⁾が存在するが、中間の周波数である血圧変動(Mayer wave:0.1Hz)や呼吸(0.26~0.33Hz)のリズムは、偶然にもろうそくの炎ゆらぎのそれに近い。この事実はろうそくの炎環境におけるヒトの鎮静作用と何らかの関係の存在を思わせるものである。

4. むすび

1/fゆらぎはヒトに快適さをもたらす可能性があり、同特性を照明環境や風量制御、壁紙、衣服などへ積極的に応用する試みがなされている。しかしながら、1/fゆらぎパワを有する波形は無数に存在するので、これを応用するには、どのような波形がヒトに快適さを与えるかの情報が不可欠である。

本論文は、1/fゆらぎの時間領域での波形パラメータと周波数領域でのスペクトルパラメータとの関係を調べるために、ヒトに鎮静効果を及ぼすとされるろうそくの

炎を対象にゆらぎの統計測定を試みた。その結果、ろうそくの炎は、0.1Hz以下の低周波においては太さや種類に拘わらず1/fゆらぎであることが確認できたこと、CRDのピーク値は0.1~0.4Hzに集中しており、これはヒトの血圧変動(0.1Hz)や呼吸周波数(0.26~0.33Hz)を含んでいること、などがわかった。後者の知見はろうそくの炎環境におけるヒトの鎮静作用と何らかの関係を思わせる興味深い事実である。

今後の課題としてはろうそくの炎と激しい焚火などの炎のゆらぎ測定と比較検討、ろうそくの炎とヒトの心拍、血圧、脳波との同時測定、統計量との相関検討、などがあげられる。

文 献

- 1) 武者利光：“ゆらぎの世界”，講談社(1980).
- 2) 武者利光編：“ゆらぎの科学1~4”，森田出版(1991-1994).
- 3) 例えば，Kobayashi M and Musha T:1/f fluctuation of heartbeat period. IEEE Trans BME-29, No.6, pp.456-457, 1982.
- 4) 例えば，山本，中尾，水谷，児玉：“睡眠とニューロン活動の1/fゆらぎ”，BME, Vol.8, No.10, pp.49-57, 1994.
- 5) 武者利光：“生体情報と1/fゆらぎ”，応用物理, Vol.54, pp.429-435 (1985).
- 6) 芦口正史，土井滋貴，高橋春雄：“1/fゆらぎ照明制御の実験”，平成5年電学全大, 66, (1993-03).
- 7) 例えば，Kanda,M:“Time and amplitude statistics for electromagnetic noise in mines”, IEEE Trans. Vol.EMC-17, No.3, pp.122-129 (Aug.1975).
- 8) 日野幹雄：“スペクトル解析”，朝倉書店, pp.154-236, 1977.
- 9) 清澤由次，藤原 修：“1/fゆらぎパワーをもつ生体刺激量のスペクトルモデルと統計量”，信学技報, EMCJ95-72, pp.21-26 (平07-12).
- 10) 例えば，宮脇一男：“雑音解析”，朝倉書店, pp.149-153, 1971.
- 11) 市丸雄平，小笠原正彦，片山宗一：“自律神経障害患者における心拍のリズムとゆらぎ”，BME, Vol.8, No.10, pp.36-48 (1994).