自然環境下における無拘束ネコの脳単一ニューロン活動の計測と解析

水谷 好成*・尾形 義徳*・高橋 俊光*・斉藤 聡*
中尾 光之*・山本 光璋*・松本 伍良**

Measurement and Analysis of Single Neuronal Activities from an Unrestrained Cat in Natural Outdoor Conditions

Yoshinari MIZUTANI*, Yoshinori OGATA*, Toshimitsu TAKAHASHI*, Satoshi SAITO*,
Mitsuyuki NAKAO*, Mitsuaki YAMAMOTO* and Goro MATSUMOTO**

We have investigated dynamics of single neuronal spontaneous activities in the mesencephalic reticular formation (MRF) of a cat in natural outdoors, using a telemetry system that could measure 7 channels of physiological signals, such as neuronal activity, electroencephalogram, electrooculogram, electromyogram, and so on. The telemetry system transmits the signals by the method of PDM/FM with about 88 MHz of main carrier. We have successfully recorded long-term spike trains of several single neurons in the MRF. Spectral analyses were carried out on the time series of counts converted from the spike train. The spectrum during waking state outdoors showed a spectral density approximately inversely proportional to frequency (1/f-like spectrum) in the frequency range of 0.01-1.0 Hz. The 1/f-like spectral characteristic during waking state was similar to the one during paradoxical sleep, but clearly different from the white-noise-like spectral profile during slow wave sleep. The 1/f-like spectra observed in the MRF neuronal activities outdoors probably suggest that the neuronal activity displays slow fluctuations both by inputs from the internal/external environments and by dynamics of the MRF neuronal network.

Key Words: single unit activity, sleep-wakefulness, biotelemetry, 1/f fluctuation, field study

1. はじめに

複雑な情報処理システムである脳の機構を解明するために、外部から刺激を与えその応答を調べる研究が一般に行われている。しかしながら、脳はニューロンレベルで見たとき、実験者による外的な刺激のない状態でも、いわゆる“自発活動”をしている。この活動は、単一ニューロンの自発的な発振、生体内外環境からの制御できない入力、神経回路網のダイナミクスなどに基づくものと考えられるが、その成因を区別することは一般には困難で

ある。しかるに、その時系列ダイナミクスについては脳の状態に強く依存することが睡眠生理学分野で明らかにされてきている。したがって、活動のダイナミクスの違いを明らかにすることは刺激に対する応答特性を調べる上でもきわめて重要であると考えられる^{1),2)}。このような考え方の下に、特に本論文では実験室から出て自然環境下に動物をおいた場合、脳内の単一ニューロン活動がどのようなダイナミクスを示すかという問題について述べる。

これまでのわれわれの実験室内での結果によれば、ネコの中脳網様体、大脳皮質体性感覚野、視床腹側基底核、海馬など、機能の異なる脳の広範な領域³⁾の単一ニューロン活動(スパイク時系列)が、徐波睡眠(SWS: Slow Wave Sleep)と逆説睡眠(PS: Paradoxical Sleep)という睡眠の2状態³⁾で異なる長時間ダイナミクスを示すことが明らかにされている¹⁾⁻⁹⁾。すなわち、スパイク時系列

* 東北大学情報科学研究科 仙台市青葉区荒巻字青葉

** 北海道工業大学 札幌市手稲町手稲前田 419-2

* Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, Sendai

** Hokkaido Institute of Technology, Sapporo
(Received December 15, 1992)

(Revised May 26, 1993)

のスペクトル密度が、徐波睡眠時には $0.01 \sim 1.0$ Hz の帯域で平坦な白色雑音様のスペクトルを示すのに対し、逆説睡眠時にはおおむね同様の帯域で $1/f$ 様スペクトルとなるという、上記のいずれのニューロン群にも共通したダイナミクスの遷移が観測されている^{3),5)}。さらに、薬理学的手法による実験^{6),8)}や、計算機シミュレーション^{10),11)}によって、その遷移には脳内広域調節系として知られているアミン系(特にセロトニン系とコリン系)ニューロンの活動が関与していることも明らかにされている。これらの実験事実やシミュレーションによって、神経回路網のダイナミクスの状態依存性とその回路網に含まれる単一ニューロンのダイナミクスによって代表されうる可能性が検証されつつある。一方、一種の自然刺激としてネコの眼前に小鳥を呈示し、注意集中させた覚醒状態においても、中脳網様体ニューロン活動は 0.1 Hz 以下の低周波帯域で平坦化する傾向が見られるものの、逆説睡眠時に類似した $1/f$ 様のスペクトルを示すことが明らかにされている⁴⁻⁷⁾。

それでは、実験動物であるネコを自然環境下においたとき、脳単一ニューロンはどのようなダイナミクスを示すであろうか。白色雑音様スペクトルであろうか。それとも $1/f$ 様スペクトルであろうか。もし $1/f$ 様スペクトルを示すとするような帯域においてであろうか。これらの疑問に答えるため、ここではテレメトリによって、屋外において無拘束状態にあるネコの覚醒時における中脳網様体領域⁹⁾の単一ニューロン活動を計測し、解析した結果を示す。さらに、そのダイナミクスを同一ニューロンの睡眠状態における結果と比較する。

2. 実験方法

ステンレス製微小電極束 ($30 \mu\text{m}\phi$, 微小駆動装置付) と各種生体信号記録用の電極を頭部に植え込んだネコを実験動物として用いた⁴⁾。ここでは、単一ニューロン活動の計測部位として睡眠-覚醒における脳の状態のダイナミクスを最もよく反映していると想像される中脳網様体領域を選んだ⁹⁾。中脳網様体は上行性網様体賦活系¹²⁾と呼ばれ新皮質や旧皮質の覚醒作用に寄与していると見られている部位に存在する。この求心性線維は末梢および脳内の広範な部位から投射され、また、遠心性にも数多くの神経核に線維を送っており脳全体を捉える上でも重要な部位であり、非特殊系の中心的存在である。さらに睡眠-覚醒の“意識状態”を判定するために、眼球運動電位図(EOG)、大脳皮質体性感覚野脳波(EEG-SI)および外側膝状体脳波(EEG-LGN)、頸部筋電図(EMG)および心電図(ECG)などの生体信号を記録対象とした。

2.1 屋外・覚醒実験

屋外の自然環境下におけるニューロン活動の計測は、大学構内の林内に設置した木枠とナイロン網で作られた 1m^3 程度の立方体のおり内で実施した。ネコはこのおり内で自由に行動できる。各種生体信号記録用電極を植え込んだネコの頭部に、Fig. 1(a)に示す送信装置を固定しテレメータ計測を行った^{13),14)}。

計測された各種生体信号は、Fig. 1(b)に示す 7 チャンネルの PDM/FM 方式¹⁵⁾によって送信された。この方式では、2 チャンネルの信号 A, B を交互にパルス幅変調(PDM: Pulse Duration Modulation)し、パルス波の Low レベル(L)と High レベル(H)の各持続時間が各信号の変調幅となるようなパルス列を作る。A チャンネルには、最も高い周波数成分をもつ単一ニューロンのインパルス信号を割り当てる。B チャンネルには、インパルス信号以外の 6 チャンネルの生体信号を時分割多重して B1~B6 として割り当てるが、インパルス信号について周波数帯域の広い筋電図信号を B チャンネルの 1 回おき

(a) Schema of the transmitter

(b) Block diagram of the transmitter circuit, and timing chart of PDM signal

Fig. 1 A transmitter used for telemetry system

にB2として選択するようにする。10パルスで1周期分(1フレーム)であり、各フレームの先頭パルスをほかのパルスと区別するためにB1信号にオフセットを加えてある。このように作成した計7チャンネルの信号成分をもったパルス列をさらに周波数変調(FM: Frequency Modulation)して送信する。受信側ではFM受信機で復調されたパルス列信号から、High, Low レベルを別々のランプ波形信号列、B, Aチャンネルとして取り出す。このBチャンネル信号から、オフセットが加えられている波高値の高いB1信号をトリガレベルで検出し、フレームの先頭を定める。使用した送信装置の仕様をTable 1に示す。

送信された信号の垂直偏波を、おりの前に設置したフォールデッド・ダイポールアンテナによって受信し、同軸ケーブルで約20 m離れた建物の壁を貫通して実験室内に信号を伝送した¹⁴⁾。ついで、FM受信機、PDM復調装置により受信信号を7チャンネルの信号に復調した。単一ニューロン活動をスペクトル解析するために、スパイク信号を矩形波に整形した後コンピュータ(NEC, PC-9801 VM 21)に取り込み、インターバル時系列として光磁気ディスク(Pioneer, DE-S 701, 片面300 MB)に連続記録した。同時に、波形整形後のスパイク時系列と脳波、眼球運動電位図などの生体信号はデータレコーダ(TEAC, XR-310)に記録すると共に脳波計(日本電気三栄(株), 1A 57)を用いてペンレコードした。さらに、おりの前に設置したビデオカメラ(Victor, GR-25)を用いてネコの行動を観察し、その映像をビデオデッキ(To-shiba, A-660 HF)によって記録した。

2.2 室内・睡眠実験

屋外で計測した同一のニューロンに対して、徐波睡眠および逆説睡眠時のスパイク時系列をつぎの手順で計測した。消灯した防音電磁シールドルーム内に設置した50(W)×60(L)×70(H)cmの小型ケージ内にネコを入

れる。ついで、ネコ頭部の電極コネクタに接続した長さ約2 mの同軸ケーブルを介して単一ニューロン活動・脳波・筋電図・眼球運動電位図などを導出する。ネコは小型ケージ内で自由に運動することが可能であり、ほぼ自然な姿勢で睡眠をとることができる。このような状態で睡眠-覚醒サイクルのニューロン活動を数時間連続計測することは容易であった。

2.3 スパイク時系列のスペクトル解析

屋外実験、室内睡眠実験で記録したスパイク時系列の中から解析区間を切り出し、これを一定の時間窓(250 ms)における計数値時系列に変換した後、パワースペクトル解析(Blackman-Tukey 法)を行った。ここでは、スパイク時系列の1 Hz以下の低周波成分を解析するために十分なものとして、時間窓を250 msに選んだ⁴⁾。

3. 計測結果

中脳網様体領域内の記録電極の位置を微小駆動装置によって変え、単一ニューロン活動を弁別度良く検出できたニューロンに対して、屋外・覚醒時および実験室内・睡眠時においてスパイク時系列の計測を実施した。本論文では、1匹のネコにおいて屋外・覚醒状態および睡眠2状態において安定な計測ができた4個のニューロンに関する解析結果を示す。各ニューロンの活動はいずれも1ヵ月のオーダで安定であり随時計測されたものである。最初に一つの例について詳述する。

3.1 屋外・覚醒状態のニューロン活動

屋外において計測したポリグラムの連続記録の1例をFig. 2(a)に示す。各段の上から順に眼球運動電位図(EOG)、大脳皮質体性感覚野脳波(EEG-SI)、外側膝状体脳波(EEG-LGN)、CR積分回路でアナログ表示したニューロンの発射頻度時系列(SPIKE)、および頸部筋電図(EMG)である。1行は15分であり計75分間の連続記録結果である。*印はアーティファクトの混入を示している。図示した実験をとおしてネコは比較的おとなしく、虫や鳥などが現れたとき以外は、ほとんど1ヵ所に留まっているか、ゆっくりとした歩行運動をしているかのいずれかであった¹³⁾。各チャンネルの受信再生波形はアーティファクトの混入時以外は安定しており、睡眠実験の場合とほぼ同様の計測が実現できた。

ネコが静かにしている状態でアーティファクトのない五つの解析区間(OD 1~OD 5)を切り出して、各スパイク時系列の性質を調べた。解析区間OD 1のポリグラムの一部を時間軸を引き延ばしてFig. 2(b)に示す。眼球運動が頻繁、かつ大きいことがEOGからわかる。またEEG-LGNには、眼球運動に関連したスパイク状のEMP(Eye Movement Potentials)波が観測できる。

Table 1 Characteristics of a transmitter for telemetry

size	60 (W) × 60 (L) × 23 (H) mm	
weight	55 g (with batteries)	
power supply	button-type battery × 2 (±1.5 V)	
channel	BFF (gain)	signal
Ch. 1 (A)	100~5 kHz (63.1 dB)	Spike
Ch. 2 (B 1)	0.1~500 Hz (44.6 dB)	ECG
Ch. 3 (B 2)	100~2 kHz (56.1 dB)	EMG
Ch. 4~6 (B 3~5)	0.5~100 Hz (69.9 dB)	EEG
Ch. 7 (B 6)	0.1~500 Hz (56.1 dB)	EOG
life time	about 7 hours	
modulation	modified-PDM/FM	
carrier	about 88 MHz	
sub-carrier	about 14 kHz

(a) An example of polygraphic records of electrooculogram (EOG), electroencephalogram in somatosensory cortex (EEG-SI), electroencephalogram in lateral geniculate nucleus (EEG-LGN), spike density process of the neuron (SPIKE) in mesencephalic reticular formation (MRF), and electromyogram of neck (EMG) obtained from a cat in the outdoors

(b) A part of polygraphic records during the analyzed episode (OD1)

(c) Spike train process of a neuron in MRF during the analyzed episode (OD1)

Fig. 2

EEG-SI には低振幅速波の持続が見られ、高い覚醒状態が維持されていることがわかる。EMG には持続的緊張が見られ、虫などを目で追うときや歩行運動の際にバースト状の活動が見られた。これらはいずれも実験室内では実現できない状態である。この解析区間のスパイク時系列を示したのが同図(c)である。図中の一つの点がニューロンの1回の発射に対応し、時間は左から右、上から下へ経過し、1行が10sである。発射頻度に明瞭な低周波ゆらぎがあることが定性的にわかる。

Fig. 2 の解析区間 OD 1~OD 5 のスパイク時系列のパワースペクトル密度を Fig. 3 に示す。各スペクトルの左

下の数字は平均発射頻度である。いずれも、0.01~1.0 Hz の帯域内で $1/f$ 様のプロフィールを示しているが、0.1 Hz 以下の低周波帯域においては後述するように解析区間による変動が大きい。

3.2 徐波睡眠と逆説睡眠時のニューロン活動

Fig. 2 と同一ニューロンの活動を記録しながら計測したポリグラムから、覚醒(W)、徐波睡眠(SWS)および逆説睡眠(PS)状態を逐次的に判定し、3状態の推移を階段状に示すヒプノグラム(hypnogram)を作成した例を Fig. 4(a) に示す。この中から δ 波の出現頻度の高い徐波睡眠相と比較的持続時間の長い逆説睡眠相を解析区間

として選んだ³⁾。徐波睡眠時(図中 SWS 1)と逆説睡眠時(図中 PS 4)のポリグラムの一部とニューロン活動の発射頻度時系列(SPIKE)を同図(b), また各解析区間に対応したスパイク時系列を同図(c), そのパワースペクトル密度を同図(d)に示す。逆説睡眠時にはニューロンの発射頻度は高くかつ低周波ゆらぎが観測され, そのスペクトルは 0.01~1.0 Hz の帯域においておおむね $1/f$ 様になっている。一方, 徐波睡眠時には発射頻度は相対的に低く, 短いバースト発射はときどき見られるが低周波ゆらぎはあまり見られず, 0.01~1.0 Hz の帯域で白色雑音様のスペクトルを示している。これらの結果はこれまでに報告している中脳網様体ニューロン活動の特性と一致している^{4),9)}。

(a) An example of hypnogram measured from a cat indoors

(b) Parts of polygram during paradoxical sleep (PS) and slow wave sleep (SWS)

Fig. 3 Examples of power spectral density curve $[(\text{spikes}/250\text{ms})^2/\text{Hz}]$ for a neuron in MRF during the waking state in the outdoors shown in Fig. 2. Mean rates of spikes (spikes/s) are shown at the left bottom of each spectral curve.

(c) During PS and SWS, examples of spike train process of a neuron in MRF

(d) Corresponding power spectral density curve $[(\text{spikes}/250\text{ms})^2/\text{Hz}]$. Mean rates of spikes (spikes/s) are shown at the left bottom of each spectral curve.

Fig. 5 Power spectral density curves [(spikes/250ms)²/Hz] for 4 neurons in MRF during waking state in the outdoors (OUTDOORS), paradoxical sleep (PS) and slow wave sleep (SWS). Mean rates of spikes [spikes/s] are shown at the left bottom of each spectral curve.

4. 検 討

4.1 スペクトル密度の比較

計測した中脳網様体の4ニューロンについて、覚醒および睡眠の各状態について解析した複数の解析区間のスペクトルを各ニューロンごとに重ね書きしたものをFig. 5に示す(Fig. 3, 4に示した例を含む)。

まず、0.1~1.0 Hzの帯域に注目すると、屋外・覚醒時と逆説睡眠時には1/f様スペクトルを大略示している。これは、ニューロン、解析区間によらず共通している。ただし、屋外においては解析区間による変動が大きい。

つぎに、0.01~0.1 Hzの帯域に注目してみると、逆説睡眠時にはどの解析区間もスペクトルの傾斜が緩やかになる傾向を有するものの1/f様の一貫したスペクトルを示している。これに対し、屋外ではこの帯域で1/f様を示すものも見られるが、平坦なスペクトルを示す解析区間が相対的に多い。屋外で見られるこの帯域における平坦化は実験室内で行われた小鳥による注意集中時にしばし

ば見られたスペクトルと類似している^{5,7)}。これは、10~100 sの時間スケールでスパイク時系列が定常であることを示している¹⁶⁾。しかし、この帯域で平坦にならないスペクトルを示す解析区間(たとえばFig. 2(a)およびFig. 3に示したOD 5)が見られることは上記の時間スケールで定常とはいえない区間も同時に多く存在していることを示している。

また、屋外においては全帯域にわたって解析区間によるスペクトルプロファイルのばらつきが大きいことがわかる。これはFig. 2(a)に見られるように屋外のニューロン活動の長時間非定常性を示していると考えられる。屋外ではさまざまな外的な感覚入力が存在し、動物の“意識状態”が常に変化している。ある区間では0.01~0.1 Hzで平坦なスペクトルをとるような定常なニューロン活動を示しながら、別の区間ではこれが非平坦なスペクトルに変化する。これに対し、外界からの入力が遮断されている逆説睡眠時には全帯域にわたってスペクトルが解析区間によらず一貫して1/f様となっている。

逆説睡眠時や屋外・覚醒時に比べると、安定した徐波睡眠時には0.01~1.0 Hzの帯域にわたって、どのニューロンでもほぼ白色雑音様のスペクトルとなり、明らかに異なるダイナミクスを示すことがわかる⁴⁾。

4.2 調節系ニューロン活動とダイナミクスの関係

神経系はアミン・コリン・ペプチドなどのモジュレータと呼ばれる物質群による調節を受けながら活動している¹⁷⁾。これらのうち大域的な抑制作用を有するアミン(特にセロトニン)ニューロンの活動状態とここで取りあげた非特殊系に属する中脳網様体ニューロン活動のダイナミクスとを関連付けて考察する。

徐波睡眠時のセロトニンニューロン活動は覚醒時に比べて低下するものの保持されておりセロトニンが分泌し続けている。すなわち、徐波睡眠時には中脳網様体ニューロンはその制御を受け、抑制的な状態に置かれているとみなされ⁹⁾、そのため低周波ゆらぎのない安定した発射をしていると推測される。

これに対し逆説睡眠時には、セロトニンニューロンは活動を停止することが知られている¹⁸⁾。したがって、中脳網様体はセロトニンニューロンによる抑制的な制御から解放されると考えられる。この結果として、中脳網様体をはじめとする脳内諸部位のニューロン活動が1/fゆらぎすると考えられる。このことは薬理学的実験^{6,8)}および計算機シミュレーション¹¹⁾で証明されつつある。

一方、覚醒時にはセロトニンニューロンは発射頻度が最大となる¹⁹⁾。したがって、セロトニンニューロンによる抑制的作用も最大となることが推測される。しかし、最近の報告によると、低濃度のセロトニンは抑制的

に働くが、高濃度のセロトニンは興奮作用を有しているといわれている。したがって、0.1~1.0 Hzの帯域で一貫して1/f ゆらぎしたという結果は、内外環境からの種々の入力存在を示唆すると共に、中脳網様体ニューロン回路網が覚醒時に有する固有のダイナミクスの特徴を示していると考えられよう。なお、実際にはセロトニンのみが関与しているのではなく、そのほかノルアドレナリンやヒスタミンなどの調節系ニューロンも関わっていると考えられる。また、コリンニューロンの活動は覚醒と逆説睡眠時に高まっていることが知られている⁶⁾。したがって、今後これらの物質機構についても検討していく必要があると思われる。

5. ま と め

屋外の自然環境下におかれた場合の脳単一ニューロン活動をテレメトリにより計測し、そのダイナミクスを調べた。室内で計測した徐波睡眠、逆説睡眠における同一ニューロンの活動と比較した結果、屋外で得られたニューロンのスパイク時系列のスペクトル密度のプロフィールは0.01~1.0 Hzの範囲内において、逆説睡眠時と類似した1/f様スペクトルを示すものが多く、同帯域で白色雑音様のスペクトルを示す徐波睡眠とは明らかに異なるダイナミクスを示した。睡眠-覚醒状態における脳内の調節系ニューロンの活動と関連付けると、屋外・覚醒時の中脳網様体におけるニューロン活動は調節系ニューロンの制御下にありながら、生体の内外環境からの入力と回路網固有のダイナミクスにより低周波ゆらぎしている状態にあると推測される。

本研究の遂行に協力していただいた東北大学情報工学科生体情報工学講座の大内真理子前技官ならびに学生諸氏に感謝する。また、本研究はトヨタ財団研究助成および文部省科学研究費補助金総合研究(A)04302033によった。ここに感謝する。なお、本研究は東北大学動物実験委員会の承認の下に行われた。

参 考 文 献

- 1) 山本, 中浜: 神経インパルス信号の時系列解析とその生理学的意義, 日本生理誌, **48**, 491/504 (1986)
- 2) 山本光輝: 脳活動のゆらぎと創造機能, 医科器械学, **59**, 109/118 (1989)
- 3) 山本光輝: 脳単一ニューロン活動の1/f ゆらぎ, 計測と制御, **29**-11, 1034/1042 (1990)
- 4) M. Yamamoto, H. Nakahama, K. Shima, T. Kodama and H. Mushiaki: Markov-Dependency and Spectral Analyses on Spike-Counts in Mesencephalic Reticular Neurons During Sleep and Attentive States, *Brain Res.*, **366**, 279/289 (1986)
- 5) 山本, 中浜, 嶋, 綾, 児玉, 虫明, 稲瀬: 逆説睡眠時のニューロン活動, 神経進歩, **30**-6, 1010/1022 (1986)
- 6) H. Mushiaki, T. Kodama, K. Shima, M. Yamamoto

- and H. Nakahama: Fluctuations in Spontaneous Discharge of Hippocampal Theta Cells During Sleep-Waking States and PCPA-Induced Insomnia, *J. Neurophysiol.*, **60**-3, 925/939 (1988)
- 7) T. Kodama, H. Mushiaki, K. Shima, H. Nakahama and M. Yamamoto: Slow Fluctuations of Single Unit Activities of Hippocampal and Thalamal Neurons in Cats. I. Relation to Natural Sleep and Alert State, *Brain Res.*, **487**, 26/34 (1989)
 - 8) T. Kodama, H. Mushiaki, K. Shima, T. Hayashi and M. Yamamoto: Slow Fluctuations of Single Unit Activities of Hippocampal and Thalamal Neurons in Cats. II. Role of Serotonin on the Stability of Neuronal Activities, *Brain Res.*, **487**, 35/44 (1989)
 - 9) 山本, 水谷, 中尾, 尾形, 高橋: レム睡眠時脳単一ニューロン活動の1/f ゆらぎ, 豊田研究報告, **44**, 103/109 (1991)
 - 10) F. Grünis, M. Nakao, M. Yamamoto, T. Musha and H. Nakahama: An Interpretation of 1/f Fluctuations in Neuronal Spike Trains During Dream Sleep, *Biol. Cybern.*, **60**, 161/169 (1989)
 - 11) M. Nakao, T. Takahashi, Y. Mizutani and M. Yamamoto: Simulation Study on Dynamics Transition in Neuronal Activity During Sleep Cycle by Using Asynchronous and Symmetry Neural Network Model, *Biol. Cybern.*, **63**, 243/250 (1990)
 - 12) M. Steriade, N. Ropert, A. Kitsikis and G. Oakson: Ascending Activating Neuronal Networks in Mid-brain Reticular Core and Related Rostal Systems, J. A. Hobson, M. A. B. Brazier (eds), *The Reticular Formation Revisited*, Raven Press, 125/167 (1980)
 - 13) Y. Mizutani, M. Nakao, M. Yamamoto and G. Matsumoto: A Telemetry System For Recording Cat's Neuronal Spike Trains During Sleep-Waking States, *Proc. 11th Inter. Symp. Biotelemetry*, 287/290 (1991)
 - 14) 尾形, 高橋, 水谷, 中尾, 山本: 自然環境下における脳幹網様体単一ニューロン活動の1/f ゆらぎ, 信学技報, **MBE91**-61, 9/16 (1991)
 - 15) S. Kuriki, Y. Tsuchida, S. Ohta and G. Matsumoto: A Multichannel Telemetry System with a Modified PDM Method, *Proc. 7th Inter. Symp. Biotelemetry*, 17/20 (1983)
 - 16) 武者, 北原: 1/f ゆらぎの物理, 応用物理, **58**-12, 1688/1695 (1989)
 - 17) 前田敏博: アミンおよびコリン作動系ニューロンと脳幹, *Clinical Neuroscience*, **6**, 127/130 (1988)
 - 18) K. Shima, H. Nakahama and M. Yamamoto: Firing Properties of Two Types of Nucleus Raphe Dorsalis Neurons during the Sleep-Waking Cycle and Their Responses to Sensory Stimuli, *Brain Res.*, **339**, 317/326 (1986)

[著 者 紹 介]

水 谷 好 成 (正会員)

1987年, 北海道大学大学院工学研究科博士課程修了。86~87年度日本学術振興会特別研究員。88年東北大学工学部情報工学科助手。93年同大学情報科学研究科助手。現在に至る。単一ニューロン活動の電気的計測と解析, 神経磁界の計測, 痛みの定量化などの研究に従事(工学博士)。

尾 形 義 徳

1990 年, 東北大学工学部情報工学科卒業, 92 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了(情報工学専攻)。現在, ダイナボット(株)総合研究所に勤務。診断システムの開発に従事。

高 橋 俊 光

1988 年, 山形大学工学部情報工学科卒業, 90 年東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了(情報工学専攻)。93 年同博士後期課程単位取得退学。同年同大学工学部電子工学科助手。現在に至る。生体信号時系列処理の研究に従事。

斉 藤 聡

1990 年, 東北大学工学部情報工学科卒業。現在, パイオニア(株)移動体通信研究所に勤務。

中 尾 光 之

1984 年, 東北大学大学院工学研究科博士課程修了。84~85 年東京都老人総合研究所助手。85 年東北大学情報処理教育センター助手。88 年同大学工学部情報工学科助手, 91 年助教授, 93 年同大学情報科学研究科助教授。現在に至る。感覚・自律系の電気生理学的研究, 神経回路網の数理的研究に従事(工学博士)。

山 本 光 璋

1963 年, 東北大学工学部通信工学科卒業。68 年同大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学。同大学医学部助教授を経て, 88 年工学部情報工学科教授。93 年情報科学研究科教授。脳単一ニューロン活動のダイナミクス解析と解釈に関する研究で, 実行系ニューロン活動のレム-徐波睡眠間での $1/f$ 白色ゆらぎの遷移現象を発見している(工学・医学博士)。

松 本 伍 良

1949 年, 東北大学工学部通信工学科卒業, 同大学工学部助手, 助教授を経て, 65 年北海道大学応用電気研究所教授, 87 年同大学名誉教授。現在, 北海道工業大学教授。医用デバイス, テレメトリ, 環境電磁工学の研究に従事(工学博士)。IEEE, バイオテレメトリ学会, ME 学会, 電気学会, 応用物理学会などの会員。

.....