

研究開発ノート

非線形細胞膜系と比較したプラズマ-シース系

谷 塚 昇

(大阪府立大学総合科学部)

(1993年 7 月 5 日受理/1993年 9 月29日改訂原稿受理)

Plasma Sheath Chaos Mechanism Connected
to Cell Membrane Nonlinear Mechanism

TANIZUKA Noboru

(Received 5 July 1993/revised manuscript received 29 September 1993)

Abstract

A study on plasma sheath [PS] mechanism related to noise is given. It is based on an Alfvén hypothesis on the double layer [or PS] which is noisy and analogous to a function of the biological cell membrane [CM].

Experimental results on noise and fluctuations observed with a Langmuir probe in a magnetron-cell discharge are given. After the author explains biological mechanism of the potential of CM and presents the $1/f$ noise so far observed from CM, he explains the self-organization of a PS which coincides with $f^{-\alpha}$ noise [α : a constant] in the magnetron-cell.

Keywords:

plasma sheath, cell membrane, nonlinear conductance, ion channel, self-organization, $1/f$ noise, magnetron discharge,

1. はじめに

理想プラズマのイメージとして、境界が無く構造が無く、しかも気体より高いエネルギー状態であるため、等量の電子・イオンがひしめきあって、電磁的、衝突的、非衝突的な多数の事象が発生している物質、という考えが一般に持たれている。そこにはエネルギーや粒子の力学的相互作用の概念が入っているが、情報の発生や伝達に関する考えは入っておらず、その理論からは構造の生

成や自己組織など、現実のプラズマに現われる現象を導くことが出来ない[1]。これは非構造・線形近似と言われる。非構造・線形近似の意味を情報の尺度であるエントロピーの言葉で説明すると、次のように表される[2]。

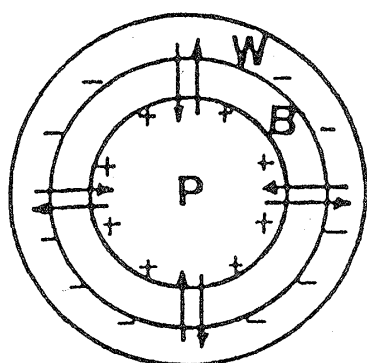
プラズマで生起する事象の数を N とする。その中の一事象の確率を p_n とすれば、 $\sum p_n = 1$ である。但し $\sum$ は、 $n = 1$ から N までの和を意味する記号である。プラズマ即ち情報源のエントロ

ピーは、 $H = -\sum p_n \log p_n$ である。プラズマに
かなる特定の波も励起しない時、情報源は白色雑
音であるから、事象は $N \rightarrow \infty$ で等確率に生起
し、 $p_n = 1/N$ 従ってエントロピーは、 $H =$
 $\log N$ ($N \rightarrow \infty$) $\rightarrow \infty$ となる。プラズマに、例え
ば $A \sin \omega t$ (A は一定振幅) のような線形波が励起
する時、情報源は決定論的波であるので、 $p_n = 1$
かつ n 番目以外の事象の確率は0である。従っ
て情報源のエントロピーは、 $H = \log 1 = 0$ であ
る。前者 $H \rightarrow \infty$ の情報源は、非構造プラズマを
意味し、後者 $H = 0$ の情報源は、情報の伝達が
無く、構造を発生しないプラズマを意味してい
る。理想プラズマは、エントロピーが零か無限大
かの、両極端のプラズマと考えられる。

現実のプラズマは、エネルギーや粒子の流れと
ともに、情報の発生と伝達があり、構造の形成・
維持がある。プラズマを、情報回路を有する媒質
系とする視点に移して考えなければならない。

2. 現実のプラズマ

実験室または天体のプラズマは、系の外部、あ
るいは核融合が行われている場合内部からエネ
ルギーが与えられて生成され、存在するものであ



P : プラズマ

B : 境界層

W : 壁または周辺環境

図1 実在するプラズマ[1]
現実のプラズマは、境界や他のプラズマや物質との
インターフェイスを持つ構造物であり、確率的な非
線形な複合要因に支配されている、情報の流れのあ
る系である。

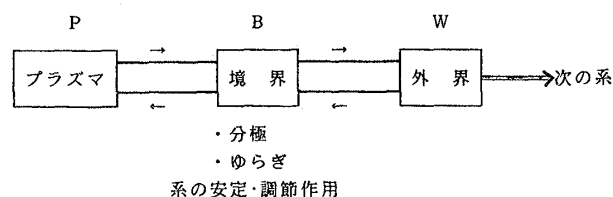


図2 プラズマ-シースの系の維持と安定化[1, 4, 16]
境界Bは本質的に非線形であり、Bの存在により
構造が生じる。

る。従って、プラズマエッジや境界領域、即ち別
の種類のプラズマや物質とのインターフェイスと
共に在る（図1参照）[1]。境界領域は非線形性を
有し、物質・エネルギー・情報の流れが存在する
場所である。そこでは構造発生が進行し、非決定
論的・確率的な法則が支配している。現実のプラ
ズマの系の概念を図2に示す。

情報理論（サイバネティクス）の言葉を使う
と[3]、図1、図2の境界領域はプラズマの系の
中で「制御器」の役目を果たす。アルバーンはダ
ブルレーヤ（図1、図2の境界領域B、シース）
では雑音・ゆらぎ現象が必ず付随すると主張す
る[4]。この主張は、「制御」が意味する「あるシ
ステムにおいて、その系の真値、即ち系を安定に
維持するための最適値を目指す努力である」とい
う概念に通じるものである。

また彼は、物理プラズマのダブルレーヤは、生
物細胞の細胞膜*（プラズマ・メンブレン、セ
ル・メンブレンとも呼ばれる）と、機能が類似し
ており、プラズマの生成・維持・保護（プラズマ
をとりまく外部環境からの）に深く関わっている
と主張する[4]。

膜の機能や膜に生起する現象を調べると、表1
に示すように、シースまたはダブルレーヤと面白
い程の相似点が見いだされる[4, 6, 7]。細胞の系
において生起する現象は、非線形系の典型的な現
象である。神経細胞の膜に関する神経生理学・分
子生物学・情報科学（計算機科学）からの研究が
進んでおり、その知識を整理し、プラズマ系の相
似現象について、異分野の視点から考察を進める

脚注* 細胞膜はプラズマ・メンブレンとも呼ばれている。ちなみに、物理プラズマの語源は、ラングミュアが生物細胞のプラズマから借りた、とされている[4]。プラズマの語源について文献[5]に説明がある。

表1 プラズマ-シース系と細胞-膜系の相似性[4,6,7]

	プ ラ ズ マ	細 胞
語 源	plasma, I. Langmuir 1928	plasma, protoplasma, 原形質
系	物理非認識系	生物認識系
膜	sheath, double layer	cell membrane, plasma membrane
膜 機 能	周辺環境から plasma を守り維持するための plasma 生成物	周辺環境から原形質を守り, 生命を維持するための細胞生成物
担 体	電子 イオン	Na ⁺ イオン, K ⁺ イオン他
現 象	分極, 両極性拡散 $I_{\text{net}} = 0$, $I_{\text{net}} \neq 0$ の状態存在	分極, 定常状態 $I_{\text{net}} = 0$, $I_{\text{net}} \neq 0$ の状態存在
膜 輸 送	物質, エネルギー, 情報	物質, エネルギー, 情報
膜 電 位	シース電位	細胞膜電位 (membrane potential)
電位揺動	power spectrum $1/f^\alpha$	power spectrum $1/f$

事は、意義ある事と思われる。

3. 細胞膜電位 [8]

水等の非極性分子は、物理的拡散によって細胞膜を通過するが、Na⁺ イオン等の極性分子は、膜に埋め込まれた蛋白質でできたチャンネルによって選択的に輸送される。そのうちイオンチャンネルやイオンポンプにより行われるイオンの選択的膜輸送が、細胞膜電位の形成に寄与している。図3 (a) の M に埋め込まれた Na⁺-K⁺ATP アーゼ (酵素蛋白質, イオンポンプ) によって、図3 (a) の細胞内 C の Na⁺ が細胞外 L に排出され、細胞外 L の K⁺ が細胞内 C に汲み入れられている。その結果、細胞内外で Na⁺, K⁺ それぞれの

イオンにおいて濃度差が発生している。表2に生物細胞におけるイオン濃度差の例を示す。

信号の伝達・処理を役目とする神経細胞においては、膜電位の分極・脱分極 (後述) の繰り返し頻度が激しいため、全細胞エネルギーの70%が、濃度差を維持するための Na⁺-K⁺ イオンポンプで消費される。

細胞膜には、濃度差による拡散方向にイオンを通すイオンチャンネルが埋め込まれており、主なものは、K⁺ を通す K⁺ イオンチャンネルと Na⁺ を通す Na⁺ イオンチャンネルである。細胞の静止状態では、K⁺ チャンネルだけがリークスルーで、K⁺ は膜を通過できるが、Na⁺ は通過出来ない (図3 (b))。従って K⁺ イオンは、図 (a) の C

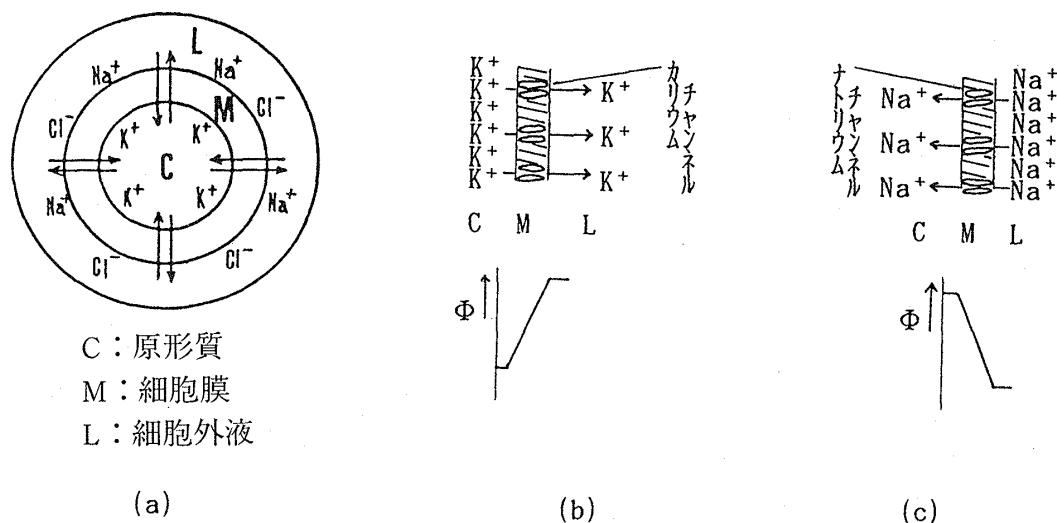


図3 細胞の系と細胞膜電位[8] (a)系の構成[1], (b)静止電位状態, (c)活動電位状態

表2 細胞内外のイオン濃度と電気化学的平衡電位

【哺乳類】

イオン	内I (mM)	外II (mM)	比 C_{II}/C_I	Φ (mV)
Na ⁺	5~15	145	29~9.7	+87~+59
K ⁺	140	5	0.036	-86

【ヤリイカ神経軸索】

イオン	内I (mM)	外II (mM)	比 C_{II}/C_I	Φ (mV)
Na ⁺	50	440	8.8	+56
K ⁺	400	20	0.05	-77

注：イオン濃度の数値は文献[8]より参照。

mM [ミリモル] は溶液1リットルに溶けているイオンの量を1/1000モルの単位で表したものの。

からLの方向に拡散するので、正イオンの過流出による電位勾配が発生し、電場によるK⁺イオン流出の阻止力と釣り合う平衡電位が決まる。平衡電位 Φ は次式ネルンストの式によって求まる[8]。

$$\Phi = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_{II}}{C_I} \quad (1)$$

$$R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$F = 9.648 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1},$$

$$T = 300^\circ \text{K}, Z = 1$$

C_I ：細胞内イオン濃度、

C_{II} ：細胞外イオン濃度

細胞膜電位とは、細胞外を基準にした細胞内の電位である。K⁺イオン・リークスルー状態の電位を静止電位 Φ_K と呼び、-80mV程度である。細胞膜の厚みは約80Åであるから、電場強度は10⁵V/cmという大変大きな値である。

外部磁場の無いプラズマのシース電位は、電子温度と電子密度の関数であって、プラズマ端から壁への電子の拡散により発生する、と説明出来るが、細胞膜の静止電位の決まりかたと非常に似ている。

神経軸索における細胞膜静止電位の周波数スペクトルについての観測結果が報告されたが、静止電位はゆらいでおり、そのパワースペクトルは1000Hzから0.1Hzの周波数範囲でフリッカ雑音(1/fノイズ)である[9,10]。神経生理学的な実験観察の結果、フリッカ雑音の発生は、K⁺イオ

ンの流束と関係がある、と報告された[10]。

開いているイオンチャンネルの総数が、膜通過イオン流に対するコンダクタンスに比例する。イオンチャンネルにおける“イオンの門”という意味の“イオンゲート”という概念が実験により確立している。イオンゲートは開(ON)か閉(OFF)の二状態をとるが、長時間のゲート開状態が存在する、と考えられてはならない[8]。ある瞬間開となり、次の瞬間には閉状態に還り、開状態を待たなければならない。その待ち時間が、イオン濃度と膜電位に依存し、これらの値が次の待ち時間に影響を及ぼす、という非線形な構造のプロセスを持っている。ある瞬間、ゲート100個の中で何個のチャンネルが開状態であるか、というようにチャンネルゲートの開確率から、膜のコンダクタンスが決る。膜のコンダクタンスは、非線形コンダクタンスである事が明らかである。

「開」の事象は「電離」の事象と似ている。イオンチャンネルのゲート開確率は、イオンチャンネルを刺激するイオンの種類(イオン種の選択)、膜電位、イオン濃度、履歴(ゲート開の直後か否か)の関数である。Na⁺チャンネルの場合の開確率の例を、膜電位を横軸にとって図4に示す。この場合、膜電位が数居値、 Φ_{th} 以上になると、確率が急激に増す。Na⁺チャンネルに刺激信号が入り、ゲートが開くとNa⁺が細胞内に流入し、その結果、膜電位が増加する。膜電位が Φ_{th} に達

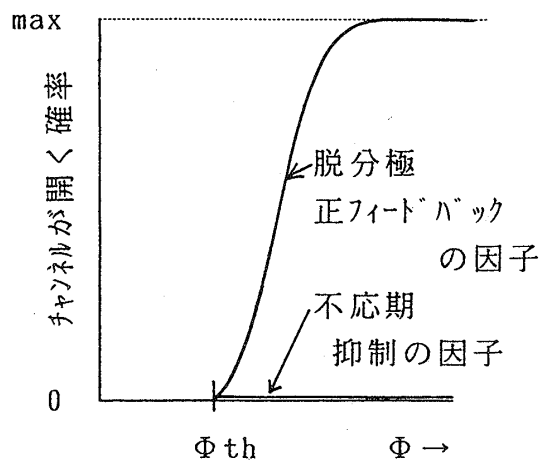


図4 Na⁺チャンネルゲートの開確率[8]
膜コンダクタンスの非線形性

すると、 Na^+ チャンネルゲート開確率が0以上となり、 Na^+ が細胞内に流入し膜電位が増加し、これによって更に開確率が増加する（正のフィードバック状態）。 Na^+ チャンネルはゲート開の後、短時間不応期に入り、膜電位が Φ_{th} 以上であっても、開確率0の状態となる。 Na^+ チャンネルの非線形コンダクタンスは、パルス電位発生の要因となる。 K^+ チャンネルの非線形性コンダクタンスとの協働によって急峻なパルス電位が発生する[8]。

Na^+ チャンネルのゲート開確率最大の時の電位は、 Na^+ に対するネルンストの式(1)から求められる。この電位を活動電位 Φ_{Na} と呼び、+50mV程度である(図3(c), 表2参照)。

静止電位、活動電位、敷居値、単一パルスを図5に示す。神経生理学では静止電位の状態を分極

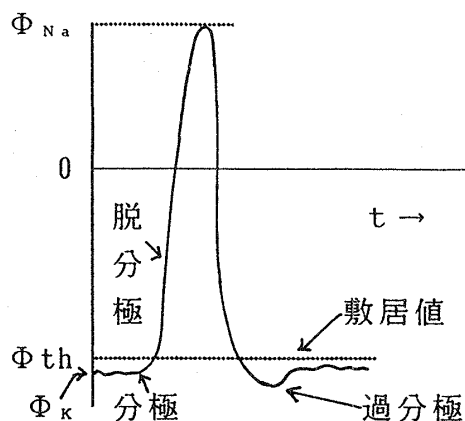


図5 分極・脱分極・過分極・敷居値と電位パルスの関係[8] 脱分極は Na^+ チャンネルの、過分極への急降下は K^+ チャンネルの非線形性による。

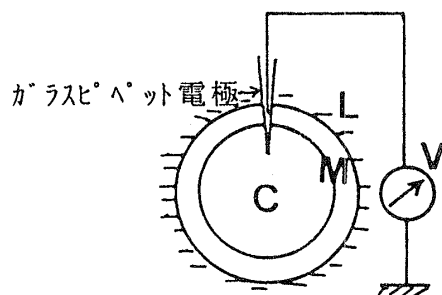


図6 細胞膜電位計測

と呼び、分極を脱することを脱分極と呼ぶ。過分極はC側に短時間の間、 K^+ イオン過多の状態がある事を示す。

ある種類の神経細胞では、パルスが自励発振してパルス列を作る。巨大ニューロンを生理溶液に浸し、図6のようにガラス電極(マイクロピペット)を細胞膜に貫通させ、膜電位を直接観測する。ニューロンを溶液に浸してしばらく放置すると、安定なスパイク放電が発生し、パルス列が観測された[11]。パルス列をFFTで周波数解析すると、0.1Hzから 10^{-4} Hzの周波数範囲において、 $1/f$ パワースペクトルを持つ事が明らかにされた[11]。

パルスを発生しない神経細胞の膜電位(静止電位)のゆらぎも[10]、パルスを発生する神経細胞の膜電位(自励発振パルス列)のゆらぎも[11]、観測の周波数領域は異なるが、パワースペクトル密度は、 $1/f$ のパワー法則に従う。

細胞膜を通過する電流の式(電荷の保存)を下に示す。

$$\sum g_i (\Phi - \Phi_i) + I_p + I_L = 0 \quad (2)$$

Σ : $i = \text{K}^+, \text{Na}^+$ の和,

g_i : i イオンに対する膜コンダクタンス

Φ : 細胞膜電位,

Φ_i : i イオンに対する平衡電位

I_p : イオンポンプ電流,

I_L : リーク電流

I_p, I_L は(2)式 Σ の項に比べて小さい[8]。従って Na^+ に対するコンダクタンスが0である静止状態の電位は $\Phi = \Phi_i$ ($i = \text{K}^+$, 静止電位) でなければならない。パルス放電時のパルスの頂点、即ち Na^+ に対するコンダクタンスが大きく、 Na^+ が主流になる状態の電位は $\Phi = \Phi_i$ ($i = \text{Na}^+$, 活動電位) でなければならない。観測値はそれを証明するものとなっている。

静止電位とパルス列の双方で観測される雑音ゆらぎは、(2)式の非線形コンダクタンスが原因であると推測できる。実験によると、静止電位は平衡電位より少し上で、静止電位の $1/f$ ノイズのパワーは、軽度の脱分極(静止電位より+

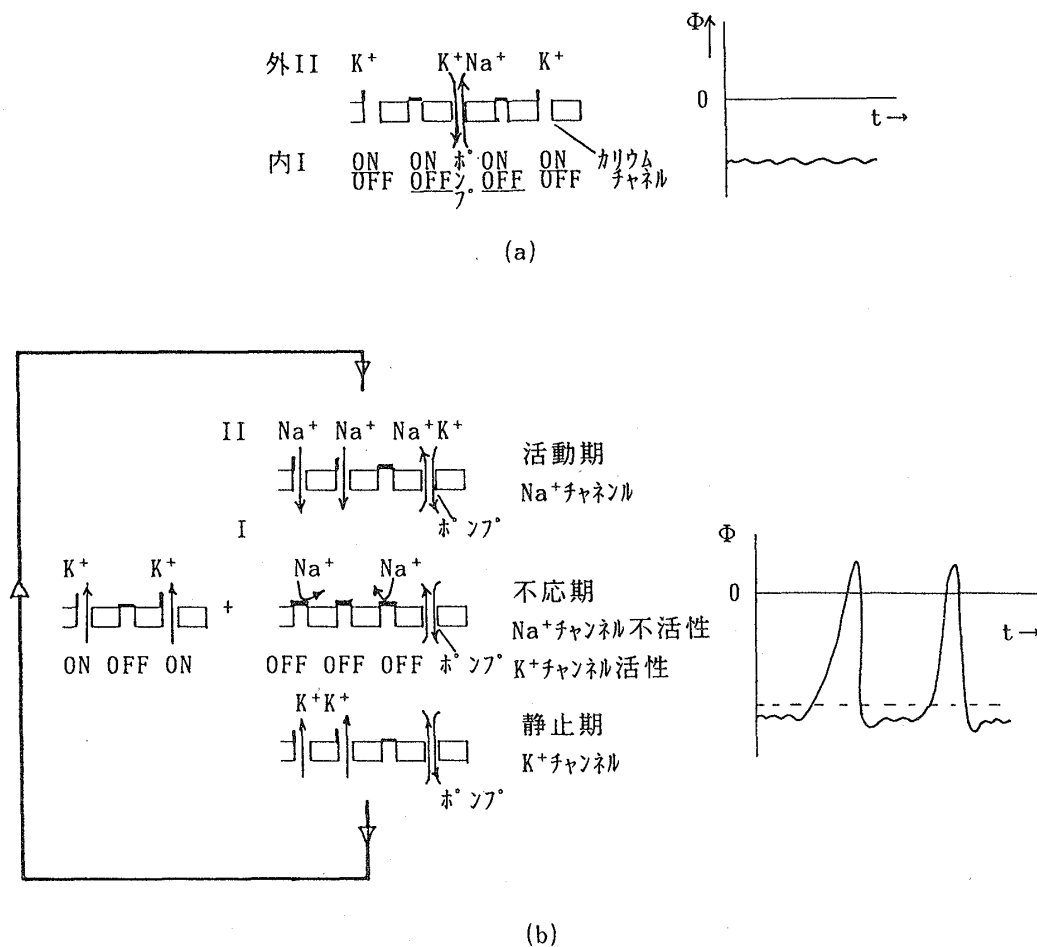


図7 (a)神経細胞の静止電位, (b)自励発振神経細胞のパルス列 (図の循環が神経細胞膜電位のパルス列を作る. Na⁺, K⁺ 両チャンネルの非線形コンダクタンスとイオンポンプによる電位エネルギーの供給による).

10mV), 通常分極 (+0 mV), 軽度過分極 (静止電位より -10mV) の順に小さくなり, 重度過分極 (静止電位より -20mV) で白色雑音となる [10]. 文献 [10] の著者は, $1/f$ ノイズの発生は K⁺ イオン流束に関係がある, と結論している.

神経細胞に静止状態とパルス列を発生する状態におけるイオン流の様子を図7 (a), (b) に示す. (a) の静止状態では, K⁺ イオンが, 細胞膜に埋め込まれたカリウムチャンネルの開閉 (ON-OFF) における開 (ON) の時に通過する. ON 状態は確率的な事象で, プラズマシース部における中性粒子の電離の事象や, シース電位を越えるエネルギーを持った電子やイオンが, シース方向に入射しシース部を通過する事象に似ている.

(b) の発振状態は, 静止電位の状態と, 何かの

原因でナトリウムチャンネルが開き正フィードバックと活動電位状態, それに続くカリウムチャンネルによる電位降下促進, ナトリウムチャンネルの不活性状態に続く静止電位の状態への復帰, という複雑な過程である. それにもかかわらず, パルス列の雑音は, 静止状態 (a) と同じ $1/f$ スペクトルである.

発振状態 (b) では, 膜電位が図5に示す敷居値を越えると, 電位のなだれ現象 (正フィードバック) が起こる. 種類の異なるイオンチャンネルの非線形性により, なだれを制御する機構も付随しているので, 安定なパルス列の発生を可能にしている.

パルス列を発生する神経細胞の膜電位における敷居値は, 1. プラズマ放電の電離電圧, 2. 高温

高密度プラズマにおける安定・不安定境界条件と似ている。1.においては、放電系の電離エネルギーが電離電圧を越えると電離なだれが起こり、抑制効果によってもとの状態に復帰する。2.においては、プラズマ系の磁場・外部磁場・密度・温度の相互関係で決る数居値が存在し、磁場・密度・温度ゆらぎが数居値を越えると不安定になる。そこで正のフィードバックが起こり、抑制効果があれば、スパイク列のような発振が起こる、と期待できる（プラズマ系の発振現象）。

4. マグネトロン放電セル

図8に実験に用いた装置の概略を示す[12]。装置は同軸円筒型の単純なマグネトロンである。カソードはタンタル熱陰極（直径0.5mm）で、陽極内径は60mmである。陽極の周囲は軸方向磁場を供給するためのソレノイドを配置している。図の探針（プローブ）は周波数分析器の高抵抗を通して接地されている。従って、プローブへは最初速度が速い電子が流入するがプローブの電位が低くなるとイオンが加速されて流入するようになるため、イオンと電子のフラックスが等しくなるようにプローブ電位はおよそプローブ付近の浮遊電位で平衡する。実験では、放電セルで放電が起こった時のプローブ電位のゆらぎ雑音を観測する。電子マグネトロンの、半径方向に流れる電子流がカットオフされる磁場電流 I_{sc} の条件は、良く知られている。

$$I_{sc} = C_0 \sqrt{\frac{U}{r_a^2 - r_k^2}} \quad (3)$$

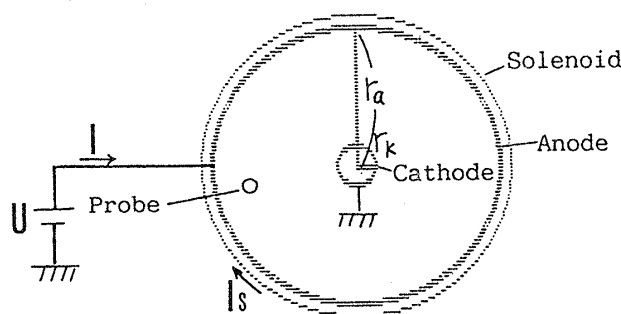


図8 熱陰極マグネトロン放電セル
ソレノイド電流で軸方向磁界を供給[12]

C_0 : 比例定数, U : 陽極電圧, r_a : 陽極半径, r_k : 陰極半径

特定のガスを管内に入れる前に、磁場電流 $I_s \equiv I_{sc}$ で電子流がカットオフされることを確かめた。通常のマグネトロンの場合、この条件で磁場に閉じ込められた電子の位置エネルギーが、マグネトロン電子回路の発振エネルギーに変換され、電磁波エネルギーとして外部に放出される。特定のガスを放電管内に入れると、カットオフ条件 $I_s \equiv I_{sc}$ から放電が開始され、放電電流 ΔI が流れ、 I_s に比べて強い磁界電流 I_{sc}' でカットオフする。これらの様子を図9に示す。マグネトロン放電では、電子の位置エネルギーが、マグネトロン放電回路での放電エネルギーに変換されたことになるが、その経緯について筆者は既に解明した[13]。 ΔI がある程度の値になると雑音ゆらぎが発生した[12,14]。図10に観測例を示す[12,15]。周波数スペクトルは、パワースペクトル表示で例外なく

$$P(f) = c \cdot f^{-\alpha}$$

の形となった[12]。ただし C は定数, α は一定値のスペクトル指数である。 α は放電電流 ΔI の関数となり、アルゴンガスを使った実験で、ガス圧力 0.07Pa, 陽極電圧 $U = 200V$, 放電電流 $0.2mA < \Delta I < 80mA$ において

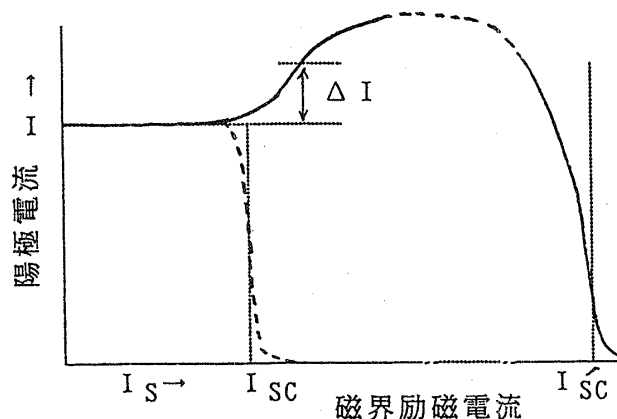


図9 磁界電流変化による陽極電流変化
 I_{sc} : 電子マグネトロンの時に陽極電流がカットオフされる磁界電流
 I_{sc}' : 放電マグネトロンの時のカットオフ磁界電流
放電電流 ΔI が流れた時、雑音ゆらぎを検出した。

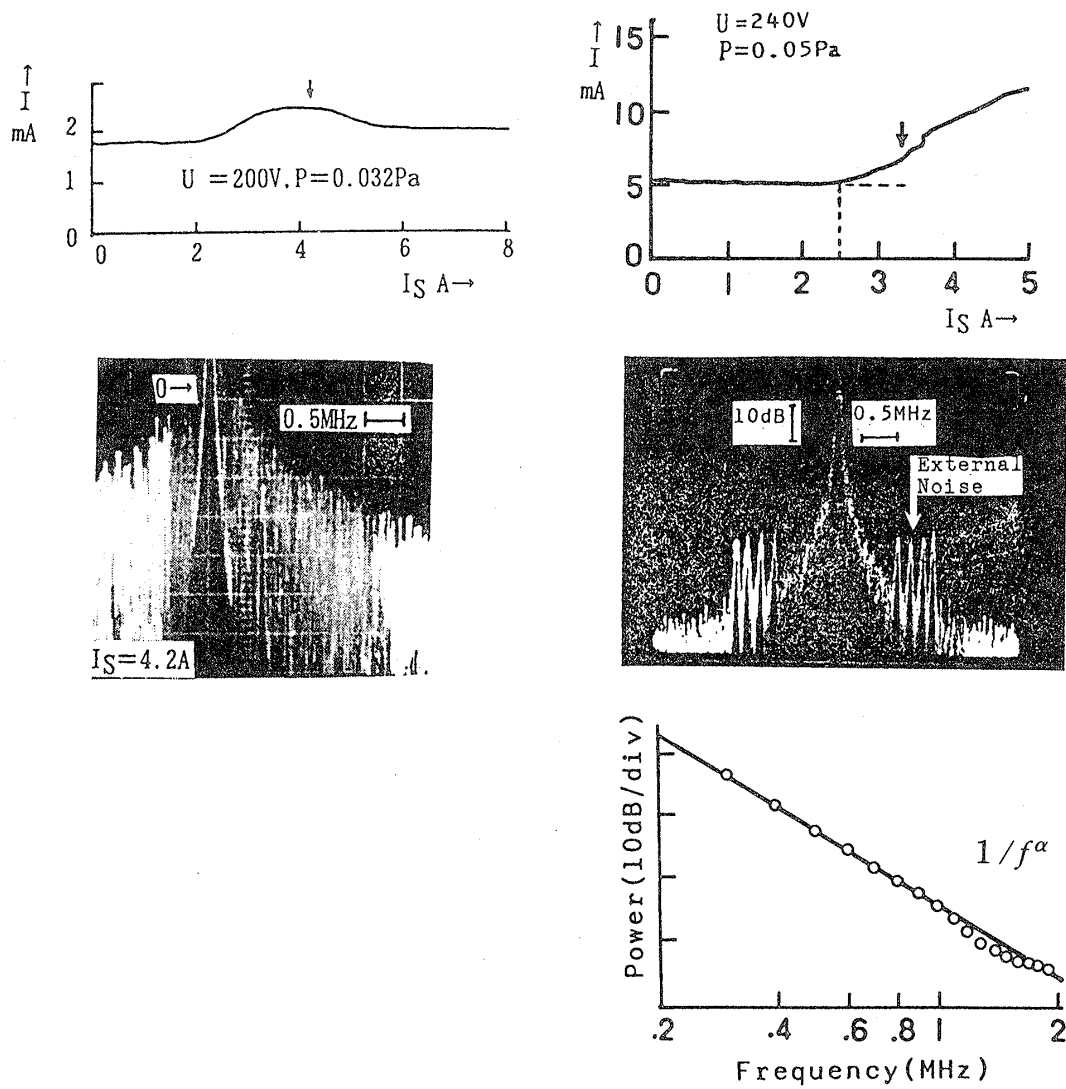


図10 放電セルにアルゴンガスを導入し、動作させた時の磁界電流—陽極電流の特性とゆらぎ雑音の検出例。雑音のパワースペクトルは $1/f^\alpha$ 特性を示す[12,15]。

$$2.9\alpha = \log_2 \frac{\Delta I}{\Delta I_0} \quad (\text{bit}) \quad (4)$$

$$\Delta I_0 = 1.5\mu\text{A}$$

が得られた[7,15]。上記の放電電流の範囲で、スペクトル指数は $2.5 < \alpha < 5.5$ であった。実験では、 $1.5\mu\text{A} < \Delta I < 0.2\text{mA}$ 及び $\Delta I > 80\text{mA}$ の領域の観察は出来なかったが、これらの領域においても、(4)式が当てはまるとすれば、次のことが言える。 $\Delta I = 1.5\mu\text{A}$ の時、 $\alpha = 0$ で白色雑音である。これは、放電電流が小さいため、それぞれの電離はランダムに起こるのと同じ効果しか持

たない事、を意味する (0 ビットの放電)。 $\Delta I > 1.5\mu\text{A}$ で $\alpha > 0$ となり、ある電離が別の電離の影響を受ける。 $\alpha \approx 1/3$ の場合は1ビットの放電、 $1/f$ ノイズ (フリッカ雑音) の場合は3ビットの放電である、と言える。 ΔI が非常に大きい時、 $\alpha \rightarrow \infty$ で零以外の周波数成分を持たない放電となる。(4)式で表されるビット数は、1.の平均情報量とは異なるものである。しかし、電離は1個の電子の種から起こるものであり、放電とゆらぎ雑音を結び付ける、経験式(4)が導かれた事実から、(4)式は、放電の情報を示すものであることを確認出来る。

放電領域の電位降下を ϕ (シース部に相当, 主にシース部端で電離が励起される), シース部のコンダクタンスを g とすれば, ϕ と g は(4)式の ΔI と隠れた相互関係を持つ. これを定式化すると次のようになる.

$$a \xrightarrow{\quad} \Delta I \xrightarrow{\quad} \phi \xrightarrow{\quad} g \quad (5)$$

(5)式は, ゆらぎがシース部の電位降下及びコンダクタンスと相関する事を表している. シース部は, プラズマ放電系を生成し, 維持するための重要な機能を担い, 系の制御部ともなっている. 放電電流 ΔI の微小な変化が電位降下 ϕ およびコンダクタンス g に伝播し, 放電の系を一巡し, 系の安定はゆらぎによって選択される. ゆらぎによって, 系を安定に維持するための, 一種の計算を行っている, と見なすことが出来る. プラズマ-シース系は非線形計算系と言える[16].

プラズマ-シース系の安定は, 境界領域(シース部)における分極・ゆらぎ作用によって調節されており(図2), 本質的に非線形な機構によって行われている[7,16].

放電マグネトロンにおいて, カットオフ磁界電流が電子マグネトロンの値より大きい値にシフトし, また放電の時, ゆらぎ雑音が発生することを示した. 磁界電流の増加は, (3)式から, r_a の減少, 又は r_k の増加を意味する. 従って, 放電セルにプラズマ-シース構造が形成された事になる(図11). 観測の結果から, 構造の形成には, ゆらぎ雑音の発生が関与していると見なす事が出来る.

放電セルのプラズマ領域とシース領域の存在の直接確認は, 種々の制約のため行っていない. シース電位は ϕ , シースの非線形コンダクタンスは g , 放電電流は ΔI だから, ガスを導入する前の電流を I_p とすると, 細胞膜の式(2)から, 放電セルに対する非線形の式

$$\Sigma g\phi + I_p + \Delta I = 0 \quad (6)$$

が得られる[6,7]. g は種類の異なる荷電粒子に対するコンダクタンスである. (6)式は, 経験式(4)と ϕ の $f^{-\alpha}$ ゆらぎ, によって束縛される. (6)

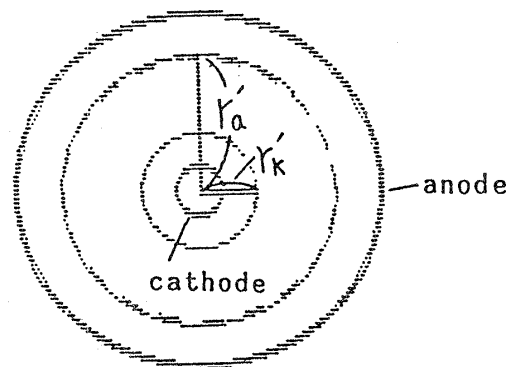


図11 電子マグネトロンから放電セルへの変化
陽・陰極半径, r_a, r_k が, 放電状態においてそれぞれ r_a', r_k' ($r_a' < r_a$ and/or $r_k' > r_k$) と変化. 放電セルに電位構造が形成される[16].

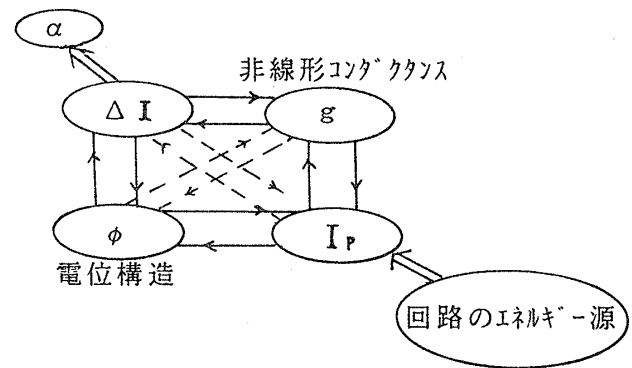


図12 プラズマ放電系の非線形モデル

式の変数の関係を図12に示す. 図の非線形モデルは, $\Delta I, \phi, g, I_p$ における相互関係を保ちながら, ゆらぎ α を発生し安定な構造を持つ系と解釈できる.

I_p は系へのエネルギーの注入, ΔI は放電現象, ϕ は電位構造を示し, g は電子・イオンに対するコンダクタンスを示す. これらの変数は相互に関係しており, その中の一つが微小な変化をすると, その変化は他の変数に伝播し一巡する. そして系は, 最も安定な位置を選ぶのである. 系の安定の為の, 一巡する微小な変化が, 雑音ゆらぎとして検出される.

筆者は, 検出されたゆらぎ雑音 α は, 系を安定にする為の, シース電位のゆらぎであると考え

5. まとめ

線形な現象の問題は、一意的な時間の関数として解決できる(直列逐次的処理)。これに対して、非線形な現象は、確率論的な要素が入り、現象が発生している系全体を視野に含めた問題として取り扱わなければならない(並列分散的処理)。ここでは、物質(粒子、エネルギー)の移動に加えて、物質に伴う“情報の発生と伝播”の概念が入り、“系における構造形式”と言う概念が生まれてくる。自然界には「真値」は実在しないが、「真値」のまわりに分散している(時間の経過とともに、値はゆらぐ)確率的な値は実在する(観測値)。

本研究では、自然や実験室に存在するプラズマを、構造を持つ非線形な系の一部として考察した。プラズマ-シース系において、境界領域のシースは、非線形性と深く関係する。シースと相似の関係にある細胞膜の現象を視野に入れて、プラズマ-シース系について検討した。

マグネトロン放電の実験によって、放電系の発生と $f^{-\alpha}$ スペクトル雑音ゆらぎの発生が同時に観測された事を示し、放電系において雑音ゆらぎの発生は、構造の発生と深く関係する事を示した。雑音ゆらぎを、非線形放電系の放電電流、電位構造、コンダクタンスの間の相互作用による、系の生成・維持と安定化のための手段として捉えた。コンダクタンスが主な意味を持つシース部は、 α ゆらぎ雑音の発生源であると考えられる。シース部を計算機の演算部(制御やメモリを含む広義の意味)と考え、系が持つ非線形計算原理とはどのようなものであるか、検討を進める価値があると考ええる。

核融合科学研究所共同研究『プラズマにおけるカオス現象』研究会での発表を勧めてくださった、九州大学 小森彰夫博士(現在、核融合科学研究所)、研究に興味を示し本誌に投稿を勧めると共に原稿を読みコメントをくださった、名古屋大学 高村秀一教授、abstract他にコメントをくださったミズリー大学 Peter H. Handel 教授に謝意を表します。

参考文献

- [1] 谷塚 昇：核融合における周辺プラズマ・対向壁間相互作用研究会報告集，高村秀一編，科研費 総合研究(B)，pp. 157-166 (1991年2月)。
- [2] N. Abramson 著，宮川 洋 訳： *Information Theory and Coding* (情報理論入門)，McGraw-Hill Inc., New York (1963) (好学社，昭61)。
- [3] 内田驍・香川靖雄編：分子生物科学 5 情報の伝達と物質の動き I (岩波，1990) 8. サイバネティクスに関して，ウィーナー著・池原他共訳，サイバネティクス—動物と機械における制御と通信—(岩波，1981) や J. R. ピアース著・鎮目恭夫訳，サイバネティクスへの認識 (SYMBOLS, SIGNALS AND NOISE) (白揚社，1963) 等に詳しい説明がある。
- [4] H. Alfvén, *Double Layers and Circuits in Astrophysics*, TRITA-EPP-86-4, R. I. T., Stockholm (1986)。
- [5] 日本物理学会編：現代物理用語 (培風館，1973) 171。
- [6] 谷塚 昇：プラズマ・核融合学会第8回年会予稿集 p. 32 (1991年3月)，同 第9回年会予稿集 p. 72 (1992年3月)。
- [7] 谷塚 昇：プラズマ・対向壁複合系における粒子輸送制御研究会報告集，高村秀一編，pp. 28-33 (1992年2月)。
- [8] B. Alberts *et al.*, 著，中村桂子他監訳： *THE CELL* (細胞の分子生物学)，Garland Pub. Inc., New York (1983) (教育社，1985)。
- [9] A. A. Verveen and H. E. Derksen, *Kybernetik* **2**, 152 (1965)。
- [10] H. E. Derksen and A. A. Verveen, *Science*, **151**, 1388 (1966)。
- [11] T. Musha *et al.*, *IEEE Trans. Biom. Eng.* **BME-30**, 194 (1983)；武者利光：応用物理 **54**, 429 (1985)。
- [12] N. Tanizuka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, 171 (1991)。
- [13] 谷塚 昇：電子情報通信学会論文誌 C J70-C, 868 (1987)。
- [14] N. Tanizuka, *Proc. 7th Symp. on Plasma Processing*, ed. T. Kato and R. Itatani, RGPE of JSAP, Tokyo, pp. 489-492 (Jan, 1990)。
- [15] N. Tanizuka, *Proc. of Int. Seminar on Reactive Plasmas*, ed. T. Goto, OCI RP, Nagoya Univ., pp. 121-124 (June, 1991)。
- [16] N. Tanizuka, in *Proceedings of 4th Symp. on Double Layers and Other Nonlinear Potential Structures in Plasmas*, ed. R. W. Schrittwieser, Innsbruck July, 1992). to be published.