

複雑系としての高周波放電プラズマ研究の一考察

長 濱 治 男*

Consideration of R.F. Discharge Plasma Research as a Complex System

Haruo NAGAHAMA

Lately a field of study, so called 'science of complex system', has become of general interest.

In this report the author considers a few phenomena of high-frequency discharge plasma as a complex system.

Keywords: R. F. plasma, Instability, Irreversible process, Non-linear phenomena, Complex system

1. はじめに

近年「複雑系」と呼ばれる学問領域が広大な学問体系へと展開しつつある¹⁾。このため、「複雑系」に関する論文^{1)~3)}や書物³⁾が発刊されてきている。自然現象は、多種多様な相互作用の複雑な絡み合いである。このため、自然現象を把握するために、複雑な自然現象を細かく要素に分解してゆき、分解された要素の基本的性質、基本的動作を順に解明していくことから、複雑な自然現象を明らかにすることに主眼が置かれてきた⁴⁾。つまり、プラズマに限らず、科学研究に対する基本的な方法は現象を出来るだけ単純化し、現象を支配する基本法則を見出すことであった。

このような方法では、結果の複雑性は原因の複雑性によるものであり、原因の全てを考慮すれば必ず結果が決定できる、という決定論的な考え方が支配的であった。しかし、プラズマをはじめ多くの自然現象の研究の結果、たとえ原因が明らかでも、結果は予測不能であることが多く、自然現象は外部から作用を加えなくても、自分で勝手に状態を変化させてゆく能力のあることが分かってきた。そのような現象を「複雑系の自己組織化」といい⁴⁾、これをどのように取り扱うかということが今後の科学研究の一つの重要な方向と思われる。

そこで、著者が今まで行ってきたプラズマ研究の結果の知見を「複雑系」にあてはめ、考察を行ったので報告する。

2. 複雑系について

2. 1 複雑系の定義

一つの安定な系があって、この系に入力信号が入ってきたとき、入力によって系の状態が変化しない場合には、この系を表す方程式によって出力を計算することができ、決定論的な結果が得られる。このような系を単一系と呼んでいる。一方、入力信号によって系自身の状態が変化する場合には、入力に比例した出力は得られず、ゆらぎを生じたり、時には入力と全く性質の異なった出力となったりしてしまう。

入力信号、すなわち外部刺激をきっかけに、系の内部で自分自身で状態変化を生じ、新しい状態に移行してゆく現象を「自己組織化 (self organization)」といい、自己組織化を含む系を「複雑系 (complex system)」と呼ぶ⁴⁾。

複雑系では、自己組織化の過程で不可逆過程や非線形現象による“固有振動の変化”や“ゆらぎ”の発生などをもたない、状態の変化に密接な関係をもつようになる。

* 電気工学科

2. 2 自己組織化の例

図1は地球磁場の様子を表している。太陽からは、太陽の表面爆発で生じる太陽風に乗って、太陽プラズマと太陽磁力線が飛来している。太陽磁力線と地球磁力線が交わると、磁力線はX状に交わることはないから、() 状に再結合が生じ、図のような磁力線分布となる⁹⁾。これを磁場の再結合といい、磁力線の「自己組織化」の一つである。再結合のとき、大きな磁気エネルギーが放出されるため、電離が促進され、オーロラの発生の原因になっている⁶⁾。

次に、ビーカに水を入れ、底から加熱する場合を考える。最初は熱源に近い底の方から温度が上がり、熱源から遠い上方が冷たい。これは、安定なエネルギー分布((a) 図)である。しかし、水は膨脹するから、高温の水は熱源から遠い上方に移動する結果、エネルギーの反転分布((b) 図)が生じる。この様子を図2に示す。この現象は、レーザの発振前のポンピングで、エネルギー準位の大きな準位に存在する粒子密度が小さい準位に存在するそれよりも多くなり、負温度状態が生じて、不安定な状態になったのと同じである。不安定状態の発生により、これをきっかけとして対流を生じる。対流が激しくなると、初めは小さな“ゆらぎ”でも、“ゆらぎ”間の非線形相互作用によって増大し、渦を生じ、最後には乱流状態となり、最初の“層流”状態から“乱流”の状態に移る「自己組織化」の現象である。

「自己組織化」の例の枚挙には限りないので、最後

にプラズマ乱流の場合を取り上げる。外部電源を用いてプラズマを加熱する時、最初は熱源に近い方から温度が上昇し、熱源から遠い方は冷たい。これは、図2 (a) の場合と同様に安定なエネルギー分布である。しかし、プラズマは膨脹するから、高温のプラズマは熱源から遠い領域に移動する結果、エネルギーの反転分布を生じる(図2 (b) に相当)。この状態は不安定な状態であるので、これをきっかけとして、波動の不安定成長が起こり、振幅の増大した波動による非線形現象が生じる。プラズマ中に生じた波動、つまり“ゆらぎ”は初め小さくても、波動間の非線形相互作用によって“ゆらぎ”は増大してゆき、最後には“乱流状態”になる。これは、“層流”の状態から“乱流”の状態に移行する「自己組織化」の現象である。“ゆらぎ”の増大は非線形相互作用にもとづくから、カオスやソリトンを含んだ複雑系である。それゆえ、複雑系としてのプラズマ乱流の研究が盛んに行われている⁷⁾。

その他、相転移、細胞分裂、化学反応、および大気的气象など多くの現象に「複雑系の自己組織化」の問題が含まれており、その研究は重要である。

3. プラズマ研究の成果と複雑系との関連の考察

「自己組織化」の例として幾つか述べてきたが、複雑系における自己組織化の一般的な機構として、次のようなプロセスが推定される。

まず、入力による刺激がある“しきい値”を越えると、安定であった状態に不安定性が発生する。これをきっかけとして、自分自身で自己組織化が進み、状態変化が起こる。この過程は不可逆反応や非線形現象を含み、ゆらぎの発生、成長をともしなう。ゆらぎによる状態変化がもとの状態に帰還される結果、離散化や集中化などの状態変化がさらに促進される結果、ついに最初の状態と異なった安定状態に落ち着き、その状態に対応した情報を出力として出す。

上述したことを考慮して、いままで行ってきたプラズマの研究、特に高周波放電プラズマの研究結果を複雑系の自

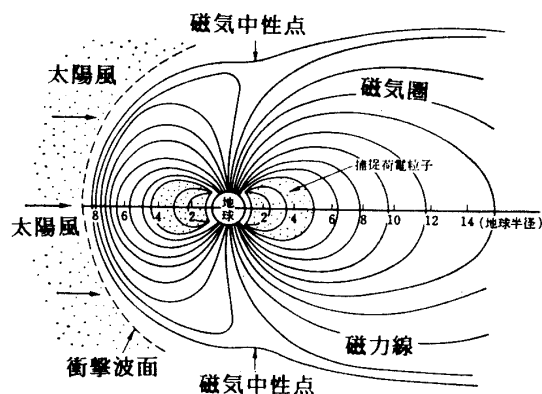


図1. 太陽磁場と地球磁場との相互作用による磁力線の自己組織化現象

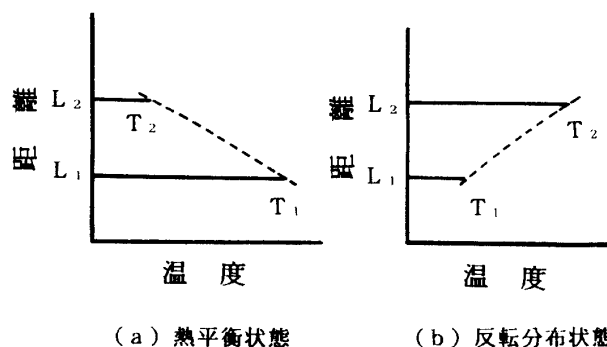


図2. 水の加熱時に見られる自己組織化現象

己組織化の観点から考察を行う。

図3は高周波放電プラズマ生成の実験装置の概略図である。研究では、プラズマの生成には1MHzおよび13.5MHzの高周波発振器を用いている。石英ガラス製の円筒状放電管上に高周波コイルを数回巻き、放電管に1 Torrから0.001 Torrの範囲内の任意のガス圧の試料ガス(純度、five-nine)を封入して、高周波コイルに高周波電圧を印加し徐々に上げていくと、まず無放電状態から発光強度の弱いグロー状の放電が発生する。図4(a)は発生直後のグロー状放電である。さらに電源電圧を上げていくと、しばらくグロー状の放電状態が続くが、あるしきい値に達すると、瞬時に図(b)に示すような発光強度の強いアーク状放電に移行する。

この移行を詳しく調べた結果、次のことが判明している。

(1) 高周波電圧を印加することによりプラズマ中に発生する高周波電界がしきい値を越えると、グロー状放電プラズマ中に不安定性が発生し、振動や波動が成長する。

この不安定性は、プラズマ中に存在する電子またはイオン速度 v と中性ガス分子との衝突周波数 ν に原因するものであることを見出した³⁾。

(2) 成長した強い電界で電離(不可逆過程)の増加、動重力(非線形過程)が生じる。

(3) これらの過程が元のグロー状からアーク状放電への移行過程にフィードバックされる結果、プラズマ中の高周波電界の振幅の増幅率にはねかえって電離が促進され、プラズマの状態変化が進む。この結果、グロー状からアーク状放電へ移行する。

(4) 移行の過程で、固有振動や非線形性のゆらぎが多数発生し、これらの励起振動が移行後のアーク状放電の電子密度、イオン密度や電子温度などのプラズマパラメータ状態の決定に密接に関係している。

図5は、グロー状放電からアーク状放電に移行する過渡状態のプラズマ中に発生した振動現象を観測した結果である。グロー状放電が発生するとすぐに、プラズマ粒子の急激な両極性拡散現象が生じ、またこれ以上の両極性拡散を抑制するような新たな力である動重力が発生している。この間には高周波電界の振動の振幅の増大が見られる。そして、この後に定常的なアーク状放電に移行している。図5は上記説明の(1)から(3)までの各種現象に該当していることがわかる。それゆえ、グロー状放電発生で生じた両極性拡散現象に基づく半径方向の電子速度 v_{or} が一種の外部刺激となり、プラズマの導電率を負にし、不安定状態をつくり、振動電圧を増幅させ、電離を促進させてアーク状放電という新しいプラズマ状態に自ら転移してゆくので、一種の「自己組織化」の現象であることがわかる。

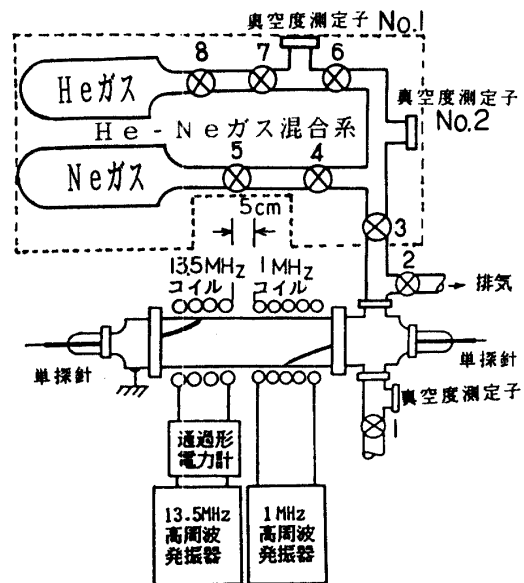
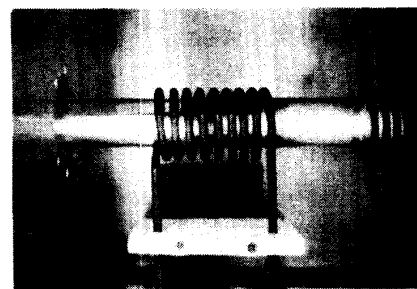
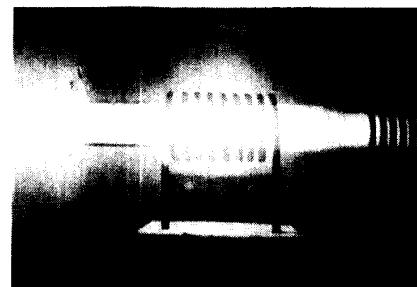


図3. 誘導結合型高周波放電実験装置概略図



(a) グロー状放電



(b) アーク状放電

図4. 2つの高周波放電状態

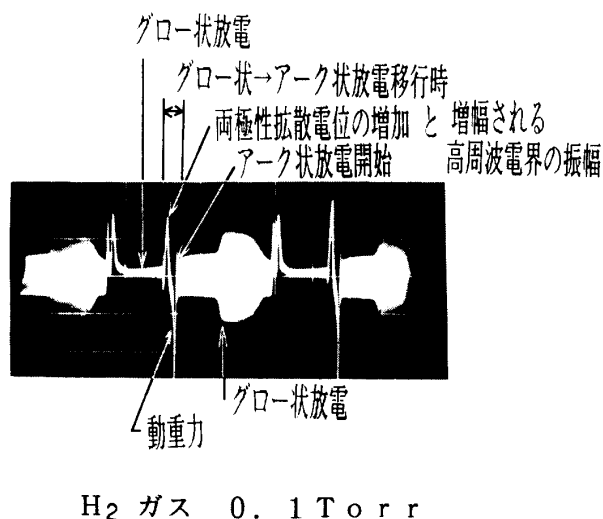


図5. グロー状→アーク状放電移行時に観測される振動

4. 自己組織化としての今後の高周波放電プラズマの研究

高周波グロー状放電からアーク状放電への移行は、複雑系の自己組織化の現象であることがわかった。このことを踏まえ、今後の高周波放電研究の方向として、

- (1) 自己組織化の過程で放出されるエネルギーの工学的利用を図る
 - (2) 複雑系の自己組織化としての一層詳しい研究を行う
- の2つが考えられる。そこで各場合について、考えてみることにする。

[1] 自己組織化の過程で放出されるエネルギーの工学的利用

グロー状放電からアーク状放電へ移行するとき、図6に示すようにエネルギーの放出と非線形相互作用による多種類の振動の励起現象が認められている。

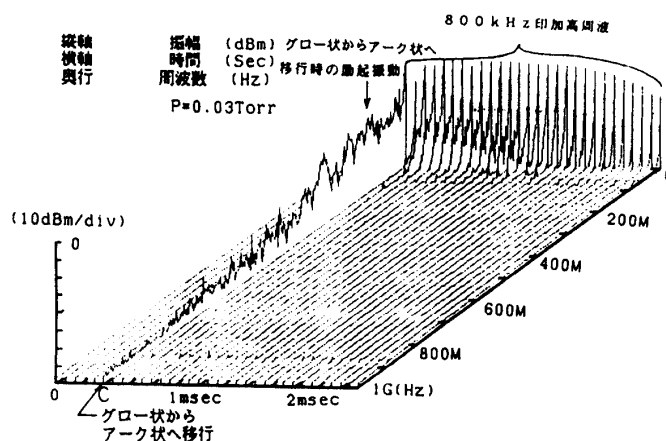


図6. プラズマ中の励起振動 (0 ~ 1 GHz)

これらがプラズマに吸収されるとアーク状放電になるが、プラズマに吸収させずに外部に取り出せば、新しい利用が考えられる。このような発想で、プラズマ中に外部から電磁波を入射し、これらのエネルギーを電磁波に与えることにより、プラズマを透過してきた電磁波のエネルギーを増大させ、プラズマをマイクロ波からレーザまでの幅広い電磁波の増幅装置として応用することが考えられる。

この考えに基づき、手始めに 10GHz のマイクロ波を用いて、マイクロ波電力の増幅実験を行った。図7は、その実験結果である⁹⁾。

普通、

$$\text{入射電力} = \text{反射電力} + \text{透過電力} + \text{吸収電力}$$

の関係が成り立つ。しかるに、入射電力を一定に保っているにもかかわらず、図(c)の反射電力において、C点で反射電力が増加しているとき、図(b)の透過電力において、減衰するはずの透過電力が約3倍増加している。このことは、プラズマを透過したマイクロ波電力が増幅したことを意味する。

数年前からマイクロ波の代わりに He-Ne ガスレーザ（発振波長、 632.8nm ）を用いて同様の増幅実験を行っているが、マイクロ波に比べ周波数が約 5×10^4 倍大きいため、利得が極めて小さく、現段階では工学的に応用できる段階ではない。

[2] 複雑系の自己組織化としての一層詳しい研究

不安定性が発生し、振動の振幅が増大し始める初期の状態では、線形理論を用いることから、振動が増大し始める条件を求めることができる。また、振動の振幅が時間的に増大してゆく成長過程を準線形理論を用いることから、振幅の増幅度を求めることができる。

しかし、グロー状からアーク状放電への移行を複雑系の自己組織化の現象として研究するためには、単純化は行わずできるだけ忠実に現象をシミュレーションしなければならない。しかし、複雑にしても解けなければ意味がないので、解ける程度に近似を行う必要がある。

このため、

- ①電子またはイオンの運動方程式
- ②連続の式
- ③ポアソンの式

を用い、グロー状からアーク状放電に移行するまでの時間 T を細かく n 等分し、 n 等分した微小時間 Δt 毎に計算を繰り返していけば、理論的に自己組織化の過程における振動電界、プラズマ密度、粒子速度などの変化を知ることができる。しかし、現段階では解析は行っていない。

5. おわりに

現在あるスーパーコンピュータを駆使しても、木の枝から舞い落ちる一枚の木の葉がどこに落ちるかを、確答することは困難である。このような複雑な現象を明らかにしようとする「複雑系の科学」が注目を集めてきている。

このため、従来からプラズマの非線形現象を研究対象として取り扱ってきたので、改めて、今までの研究結果を「複雑系の自己組織化」の現象として見直し、考察を行った。

この結果、誘導結合型高周波放電グロー状プラズマ中で生じる半径方向の両極性拡散現象が一種の外部刺激となり、プラズマの導電率を負に転化させ、不安定状態を発生させ、これらの現象がプラズマ系内部で帰還を繰り返す。

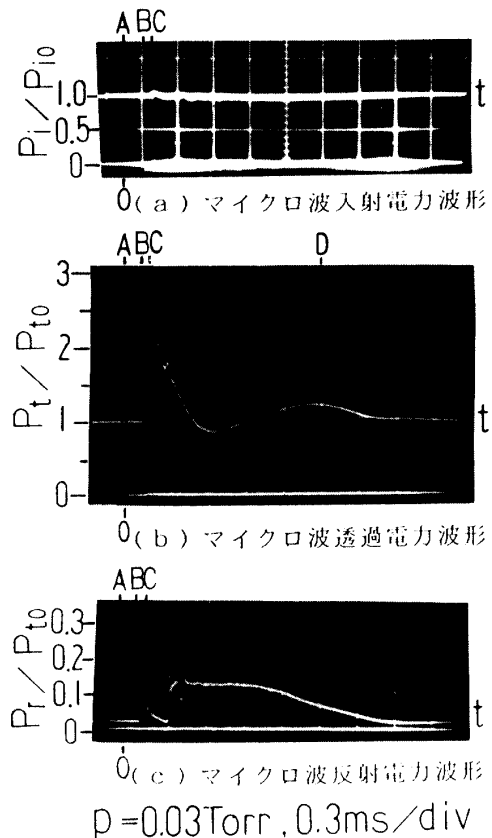


図7. 透過マイクロ波電力の増幅現象

返えされ、生じた振動の振幅がどんどん増幅される結果、この強い電界で電離が促進されるため、グロー状からアーク状放電という新しいプラズマ状態に自ら転移してゆく、一種の「複雑系の自己組織化」現象であることがわかった。

おわりに、終始懇切なるご指導、ご鞭撻頂いております関西大学工学部電子工学科教授高元曄夫博士に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤哲也 : 日本物理学会誌、50巻5号(1995)340
- 2) 多田、橋本、片桐、高元 : 平成8年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集G21
- 3) 佐藤哲也 : 物理学最前線31、共立出版(1993)63
- 4) 1)に同じ
- 5) 後藤憲一 : プラズマ物理学、共立出版(1967)230
- 6) 関口 忠 : 現代プラズマ理工学、オーム社(1979)196
- 7) 日本物理学会編 : プラズマと核融合、丸善(1976)32
- 8) 長濱、福村、高元 : 電気学会論文誌A105巻5号(1980)265
- 9) 長濱、高元 : 核融合研究61巻4号(1989)258

(平成8年12月16日受理)