電解質プラズマにおけるソリトン

百々太郎

(愛媛大学 理学部)

(1983年10月6日 受理)

Solitary Wave in Electrolyte Plasma

Taro DODO

(Received October 6, 1983)

Abstract

Possibility of the propagation of solitary wave in electrolyte has been investigated. Configuration of rectangular cages in NaCl electrolyte solution simulates the double layer plasma apparatus of Ikezi and others. Electrical pulse is applied to the cages and the electrical signal is picked up by a single probe inserted into the electrolyte. The signals picked up by the probe are an electrostatic displacement current in a dielectric (water) and an ion current flowing into the probe by the electrical potential difference between the electrolyte and the probe. The signal, delayed from the applied electrical pulse, indicating the solitary wave in the electrolyte plasma could not be detected by the probe. Investigations on the behaviour of the ion indicate that the collision frequency between the ion and the water molecule is so high that the ion acoustic wave decays extremely rapidly and the solitary wave cannot be formed.

The interaction between the ion in electrolyte and the water molecule is much stronger than the interaction between the ion and the neutral gas molecule in gaseous plasma, and the behaviour of the ion in the electrolyte plasma is different from that in the gaseous plasma.

プラズマ物理学の基本的概念の一つであるところの Debye shielding length は, Debye の電解質溶液の理論で導入されたものである¹⁾。

Department of Physics, Faculty of Science, Ehime University, Matsuyama, JAPAN 790

ガスプラズマに関してのプラズマ物理学は著しい発展があったが、この成果の一部を再び電解質溶液における現象に再現できないものか試みてみた。

プラズマ基礎実験の美事な成果の一つに、Ikezi 等によるソリトンの伝播の実験がある²⁾。ガスプラズマにおけるイオン音波の非線形性を取り入れると、ソリトン解を持つ Kortweg-de Vries 方程式を導けることが示されている³⁾。Ikezi 等は電気二重層プラズマを用いて、イオン波のパルスがソリトンとして振舞うことを示した。彼等の仕事に対応する実験を電解質溶液において試みた。

電解質溶液の中に金網で籠をつくり、その中央に仕切り網を置いて、片方の籠と仕切り網との間にパルス電圧を印加して、他方の籠の中に挿入したプローブで信号を検出するという方法を取り、ガスプラズマにおけるソリトンの実験⁴⁾のやり方に倣った。電解質溶液は HCl と NaCl を用いた。HCl では、陽イオンの移動度が陰イオンのそれよりも約一桁大きいということによって特徴的な差異が見られないかと思ったが、NaCl での実験と相異は無かった。陰・陽イオンの移動度がほぼ等しいとして代表的に用いられるのは、KCl であるが、今回の実験の目的には、NaCl でも KCl でも本質的な差は無い。イオン濃度を 10^{-5} モル / litre (イオン密度 6×10^{15} 個 / cm^3) から 1 モル / litre の範囲で実験した。

プローブで得られた信号は、期待に反してソリトンの形とはなっていなかった。イオン濃度が 10^{-5} モル / ℓ 以下では、純水の場合と全く同じ信号で、溶液を誘電率 80 の誘電体として電波が伝わって来る信号のみであった。 10^{-3} モル / ℓ 以上のイオン濃度となると、受信信号のうちイオン電流の寄与が変位電流(電波としてのもの)よりも大きくなる。しかしプローブで受信された電流波形は、籠に印加されたパルス電圧と同じ波形である。すなわち印加電圧によって上昇したプラズマ電位とプローブ電位との差によって流入するイオン電流である。電解質プラズマ内を伝播して来たプラズマの疎密波ではない。伝播速度 10^2 cm/sec (神経内パルスの伝播速度) $\sim 10^5 \text{ cm/sec}$ (イオン音波) に相当するような遅延時間の後に到達するような信号が無いものかと注意したが、電圧印加と同時に観測される信号のほかには遅く伝わって来る信号は認められなかった。

上の実験においては、イオン音波の励起のし方がまずかったので、ソリトンが作れなかったというおそれはある。生体神経軸索内のプラズマに電位パルスを発生させるのは、細胞膜を通過のナトリウムイオンとカリウムイオンの互に逆向きの透過というようなことを通じて行なわれているので、電解質溶液のようにプラズマ密度の極めて高い所へ電位パルスを作るとは非常にむづかしい事かも知れない。ただ、以下に述べるような考察から、電解質溶液ではソリトンを作るとは原理的に無理であると考えられる。その要点は、イオンと水の分子との衝突周波数が極めて高いので電解質溶液内で

はイオン音波は存在しない、従ってその非線形波動であるソリトンも存在しないということである。

流体モデルで正負イオンの線形化された運動方程式は

$$M_{\pm} \dot{\mathbf{v}}_{\pm} = q_{\pm} \mathbf{E} - \frac{1}{n_0} T \nabla n_{\pm} - M_{\pm} \nu_{\pm} \mathbf{v}_{\pm} \quad (1)$$

記号は標準のものであって、温度 T にはボルツマン定数を含めてあり、 n_0 はイオン密度で $n_{\pm}$ はそのゆらぎ、 $\nu_{\pm}$ はイオンと水の分子との衝突周波数である。この運動方程式と、夫々のイオンの連続の式、ポアソン方程式を連立させて、フーリエ分解して分散式を求めると、

$$\epsilon_{H_2O} \omega^2 = \frac{\omega_+^2}{1 - \frac{k^2 T}{M_+ \omega^2} + \frac{i \nu_+}{\omega}} - \frac{\omega_-^2}{1 - \frac{k^2 T}{M_- \omega^2} + \frac{i \nu_-}{\omega}} \quad (2)$$

を得る。ここに ϵ_{H_2O} は水の誘電率 (~ 80 for $\omega/2\pi < 10^9$ Hz, ~ 2 for $\omega/2\pi > 10^{12}$ Hz) で、 $\omega_{\pm} = (4\pi n_0 q_{\pm}^2 / M_{\pm})^{1/2}$ は正負イオンのプラズマ振動数である。

$k^2 T / M \omega \gg \nu$ で準中性であれば、音波の分散関係

$$\omega = k (2T / M_+ + M_-)^{1/2}$$

を得るが、衝突周波数 ν は非常に高く $10^{13}/\text{sec}$ 程度もあるので、波は速やかに減衰することになる。

神経軸索内の電気パルスの発生と伝播は、Hodgkin-Huxley によって、細胞膜を通しての N_a^+ , K^+ イオンの透過により行なわれるということが明らかにされている。電解質プラズマ内のソリトンの伝播が可能であるならば、電位パルスの発生にはイオンの膜透過というようなプロセスを必要とするとしても、伝播はソリトンとして扱えるのではないか、神経パルスの伝播速度が軸索の太さに依存するということもソリトンの伝播速度が duct の断面積に依り得るということも両立し得る、というのがこの実験を試みた動機である。生物の方の専門家からすると、神経内パルスの伝播には、あくまでも細胞膜の働きが関与している証拠があり、たとえ電解質ソリトンが伝播し得てもそれは神経スパイクの伝播とは関係が無い、ということであるらしい。

電解質プラズマは、高密度プラズマとして興味をひく対象であるが、イオンと水の分子との衝突周

波数が高すぎるというのが、致命的欠陥のように思われる。温度が低いのでDebye sphere 内のイオンの数が少いということや、ガスプラズマにおいては、慣性の小さい電子の演ずる役割が大きいがそれに相当するものはむしろ水のマクロな誘電率であることなど、ガスプラズマとの違いについて注意しなければならないことも多い。低電離ガスプラズマの常識からすれば、軽いイオンの方がイオン易動度は大きいと考えられるが、 K^+ , Na^+ , Li^+ の順に移動度が小さくなってゆく。これはイオン半径が小さい方がイオンの周りの電場の強さが大きく、従って軽いイオンの方がひきつれてゆく水の分子（水和水）の数が多いので易動度が小さくなるという理由による。実効的な衝突周波数がこのような事情に支配されているのであれば、プラズマ振動が関係するような高周波領域では、低周波領域とは異った易動度となることも予想される。

参 考 文 献

- 1) P. Debye and E. Hückel : Phys. Zeitschrift 24 (1923) 185.
- 2) H. Ikezi, R. J. Taylor, and D. R. Baker ; Phys. Rev. Letters 25 (1970) 11.
H. Ikezi ; Phys. Fluids 16 (1973) 1668.
- 3) H. Washimi and T. Taniuti ; Phys. Rev. Letters 17 (1966) 996.
- 4) R. J. Taylor, K. R. Mackenzie and H. Ikezi ; Rev. Sci. Instr. 43 (1972) 1675.