

# 負イオンプラズマ中の衝撃波研究とシース研究との関連性

大分大学 市來龍大, 金澤誠司  
九州大学 河合良信

負イオンを含むプラズマ中で伝搬する負の電位揺動を持つイオン音波衝撃波についての研究の計画とその意義について記述する。また、負の衝撃波とシース構造との関連性について考察し、衝撃波に類似するシース構造が負イオンプラズマ中で定常的に形成する可能性を議論する。

## 1. 研究背景

負イオンを含むプラズマ中では、負の電位揺動を持つイオン音波衝撃波が伝搬すると予測される。その衝撃波が定常的に伝搬するためには、KdV 方程式に散逸項を導入した系で非線形性、分散性、および散逸性が釣り合う必要がある。散逸性を制御することにより、負の衝撃波の定常伝搬が実現可能であるか否かをダブルプラズマ装置を用いて検証する予定である。

ところで、イオン音波衝撃波はシースと同様の理論で記述される。これに関連して、負イオンプラズマ中においては、負の衝撃波と同じ特徴を持つシースが存在するのではないかとこの着想を得た。ここでは、衝撃波実験の計画および衝撃波とシースの関連性の考察について報告を行う。

## 2. 負の振幅を持つ衝撃波

大気中で発生した急激な密度勾配は非線形性によって急勾配に成長し、その効果と粒子衝突によるエネルギーの散逸効果が釣り合うことによって、定常な波形、すなわち衝撃波が形成される。一方、プラズマは分散媒質であり、非線形性と分散性が釣り合った波動がイオン音波ソリトンである。非線形性と分散性にエネルギー散逸の効果が加わることにより、プラズマ中では振動型の衝撃波が形成される[1]。このとき波動は KdV 方程式に散逸項を加えた次の方程式で記述される。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + p\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + \frac{1}{2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \xi^3} + L(\varphi) = 0 \quad (1)$$

ここで  $\varphi$ ,  $\tau$ , および  $\xi$  は規格化した電位、時間および空間座標であり、非線形項の定数  $p$  は負イオン濃度  $r = n_-/n_+$  および伝搬速度の関数である。 $L(\varphi)$  が散逸項であり、散逸の機構により様々な形をとる。KdV 方程式系では  $r$  が 0.1 程度を超えると  $p$  が負となり、それに伴い負の振幅を持つソリトンが伝搬することが検証されている[2]。これと同じ理由で、負の振幅を持つ振動型衝撃波も(1)

式から導出される。負の振動型衝撃波に準ずる波動の観測は 2 例あるものの[3,4]、非線形性・分散性・散逸性が全て釣り合った定常的な衝撃波伝搬は研究されていない。定常伝搬の意味を説明するため、以下に筆者らによる研究[4]を紹介する。

実験はダブルプラズマ装置中に生成した  $\text{Ar}^+$  正イオン,  $\text{F}^-$  負イオン, および電子からなるプラズマを用いて行った。図 1 に示される負のランプ型電圧をドライバ側の陽極に印加することにより衝撃波を励起し、Langmuir プローブによる電子飽和電流揺動の検出により観測を行った。図 1(a) および(b)は  $r = 0.2$  および  $0$  のプラズマ中で観測されたオシロスコープ信号であり、負イオンが存在する場合にのみ負の密度勾配が徐々に衝撃波面に発展し、イオン音波衝撃波に類似した振動構

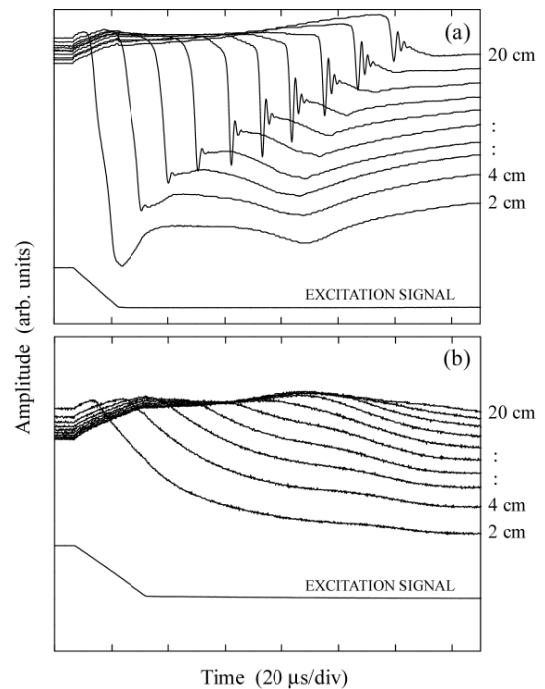


図 1 負の密度揺動の発展。(a)  $r = 0.2$ . (b)  $r = 0$ . 右の距離はセパレーショングリッドからプローブまでの距離。

造が形成されることが分かる．しかしこの波動は伝搬とともに急激に減衰しており，定常に伝搬する衝撃波ではないと考えられる．

同様の状況で散逸性を制御し，衝撃波を定常化する実験を行う予定である．低圧プラズマ中の散逸効果としては，イオン-中性粒子衝突，Landau減衰などが考えられる[5]．その他，磁場による荷電粒子の軌道制御についても注目している．

### 3. 衝撃波様のシースについて

前章で説明した負の振動型衝撃波の定常化は，負イオンプラズマの物理的挙動を明らかにするのみならず，プラズマ応用の開拓につながる可能性を有しているのではないかと考えている．

定常的な衝撃波は，シースと同様の理論で記述される．ここでは静止しているある電位構造を想定し，それに向かってイオンが初速度 $v$ で突入して連続の式を満たし，電子は Boltzmann 分布をしているとき，電位構造中でのイオンと電子の中性条件を満たす $v$ を求める[6]．負イオンのないプラズマ中では  $v > c_s$  という解が求められ，ここで  $c_s$  はイオン音速である．これを電位構造に固定した座標系で観測すれば電位構造はシースとみなされ  $v > c_s$  は有名な Bohm のシース基準を表す．一方，イオンに固定した座標系で見た場合，電位構造は静止したプラズマ中をイオン音速以上  $v > c_s$  で伝搬する衝撃波を表す．つまり，シースと衝撃波はもともと慣性座標系のみを異にする現象であるといえる．しかし，通常のプラズマ中ではシースの電位は負であり，衝撃波の電位揺動は正である．この極性の違いにより，シースと衝撃波は全く同一の現象ではありえない．ところが前章で紹介したように，負イオンプラズマ中では衝撃波の電位揺動は負である．さらに， $r = 1$  (ペアプラズマに対応) でもない限り，負イオンプラズマ中においてもシースの電位は負である．つまり負イオンプラズマ中ではシースと衝撃波の極性が同じになるため，これらは同一の現象であり得るのではないかと考えられる．

では，負イオンプラズマ中に自然に形成されるシースは全て衝撃波と同一の構造であるかと問われると，おそらくその可能性は低いようである．シースを観測した過去の事例を見ても，衝撃波のような振動構造は観測されていない[7,8]．そもそも，負イオンプラズマ中のシースを解明すべく構築された理論は衝撃波とは無関係に多く存在している[9-11]．これらの理論では，シースに初速度 $v$ で突入する粒子は正イオンのみであり，負イオンは電子とともに Boltzmann 分布が仮定されている．

衝撃波と同じ構造を持つシースが存在するとすれば，それは上記のシースとは特性が異なる．すなわち，衝撃波様シースには正・負イオンの両方が初速度 $v > c_s$ で突入する．この条件は，Bohm のシース基準と同様にプレシースで正負イオンがこの速度に到達していることを要請している．プレシースのような単純な電場構造で正負イオンを同じ方向に加速することは不可能であるが，適切な技術を用いてこの初速度の条件を満たすことさえできれば，衝撃波様シースを定常的に維持できるのではないかと考えられる．このとき，シースから基板には正イオン，負イオン，電子が定常的に突入してくることになるため，エッチング時のチャージアップ抑制や正・負イオンの両方を利用した新規プロセスの開発につながりはしないだろうか．

衝撃波様シースの検証にはダブルプラズマ装置以外にも，いずれにしてもまずは負の衝撃波の定常伝搬を実現しなくては，衝撃波様シースの定常的な存在は疑わしいままである．このような理由で，負の衝撃波の基礎的研究は意義が高いと考えている．

### 謝辞

本研究計画の実施にあたり，九州大学・田中雅慶教授および江頭ゆかり氏から実験装置に関するご支援を賜りました．心より御礼を申し上げます．

### 参考文献

- [1] R. J. Taylor *et al.*, Phys. Rev. Lett. **24**, 206 (1970).
- [2] G. O. Ludwig *et al.*, Phys. Rev. Lett. **52**, 275 (1984).
- [3] Y. Nakamura, Proc. 2000 Int. Conf. Plasma Phys., Vol. 2, p. 396 (2000).
- [4] 市來, 河合, 日本物理学会第 58 回年次大会講演概要集, 第 2 分冊, p. 249 (2003).
- [5] Y. Saitou and Y. Nakamura, Phys. Plasmas **10**, 4265 (2003).
- [6] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, Plenum Press, 1984, Chap. 8.
- [7] K. Koga and Y. Kawai, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 1553 (1999).
- [8] K. Takizawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **90**, 011503 (2007).
- [9] H. Amemiya, J. Phys. D: Appl. Phys. **23**, 999 (1990).
- [10] H. Shindo and Y. Horiike, Jpn. J. Appl. Phys. **30**, 161 (1991).
- [11] A. Kono, J. Phys. D: Appl. Phys. **32**, 1357 (1999).