

# 負の電位揺動を持つイオン音波衝撃波 ～シースの物理との関連性～

市來龍大\*, 金澤誠司 (大分大学)

河合良信 (九州大学)

Ion Acoustic Shocks with a Negative Potential Fluctuation

- Relation to Sheath Physics -

Ryuta Ichiki\*, Seiji Kanazawa (Oita University)

Yoshinobu Kawai (Kyushu University)

## Abstract

Ion acoustic shock waves with a negative potential fluctuation (rarefaction shocks) are theoretically expected to exist in plasmas with a considerable amount of negative ions. We consider that the physics of the rarefaction shock and of the sheath in negative ion plasmas have a deep relation so that investigating rarefaction shocks will lead to understanding sheath. Our experiment using a double plasma device exhibited that rarefaction shock-like waves propagate in negative ion plasmas.

キーワード：窒化処理, 表面硬化, パルスアーク型プラズマジェット, 大気圧プラズマ

(Keywords, nitriding, surface hardening, pulsed-arc plasma jet, atmospheric-pressure plasma)

## 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 (以下, 「負の衝撃波」と呼ぶ) 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. 筆者らは, 散逸性を制御することにより, 負の衝撃波の定常伝搬についてダブルプラズマ装置を用いて実験的研究を行っている.

ところで, イオン音波衝撃波はシースと極めて類似した理論で記述される. これに関連して, 負イオンプラズマ中におけるシースの体系的解明に, 負の衝撃波研究が役立つのではないかとこの着想を得た. ここでは, 衝撃波とシースの関連性の考察および衝撃波予備実験の結果について報告する.

## 2. イオン音波衝撃波

**(2.1) 負の密度揺動を持つ衝撃波** 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, 図 1 に示すようにその非線形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で, プラズマ中では振動型の衝撃波が形成される<sup>(1)</sup>. 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

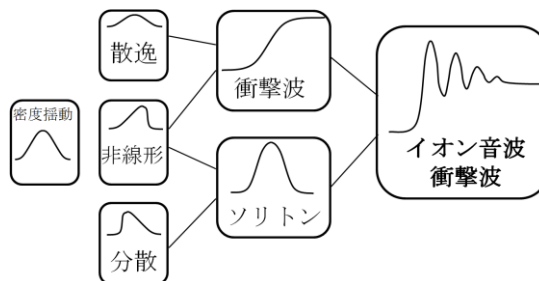


図 1 イオン音波衝撃波を含む典型的な非線形波動と非線形性, 分散性, 散逸性の関係.

Fig. 1 Overview of ion acoustic shocks, monotonic shocks, and solitons.

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<sup>(2)</sup>。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 1 例あるものの<sup>(3)</sup>、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。

**〈2・2〉 衝撃波とシースの関係性** 前節で説明した負の衝撃波の定常化は、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、負イオンプラズマ中のシース構造の研究につながる可能性を有していると考えている。

定常的なイオン音速衝撃波は、シースと同様の理論で記述される。図 2 に示すように、ここではある電位構造とプラズマが速度  $v$  で相対運動している系を考える。イオンが電位構造から加速・減速を受けながら連続の式を満たし、電子が Boltzmann 分布をしている場合、電位構造中のイオンと電子の中性条件を満たす  $v$  を求めると、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る<sup>(4)</sup>。ここで  $c_s$  はイオン音速である。これを図 2(a)のようにプラズマ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。一

方、これを図 2(b)のように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。つまり、流体論において衝撃波とシースは Galilei 変換によって関係づけられる現象であるといえる。しかし、通常のプラズマ中では衝撃波の電位揺動は正であり、一方シースの電位は負である。この極性の違いにより、シースと衝撃波は同一の現象ではありえない。ところが前節で紹介したように、負イオンプラズマ中では衝撃波の電位揺動は負になる。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。つまり図 3 に示されるように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<sup>(5),(6)</sup>。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<sup>(7)-(9)</sup>。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、それは負イオンに Boltzmann 分布を仮定する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るはしないだろうか。

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。このような理由でも、負の衝撃波の基礎的研究は意義が高いと考えている。

### 3. 負の衝撃波励起実験

**〈3・1〉 実験方法** 実験は図 4 に示されるダブルプラズマ装置(直径 45 cm, 長さ 100 cm)を用いて行った。ダブルプラズマ装置はドライバ領域およびターゲット領域と称する 2 組の直流放電極系から成る。陽極は矩形のステンレス容器に永久磁石を封入した籠であり、熱陰極として直径 0.15 mm の 1% トリエテッドタングステンのフィラメントを用いる。永久磁石はマルチカスプ磁場を形成し高エネルギー電子の閉じ込めに寄与している。一方、実験領域であるチャ

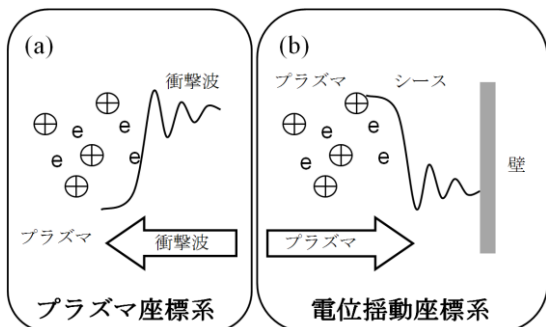


図 2 衝撃波とシースの関係性。流体論では Galilei 変換の関係性にある。

Fig. 2 Shock wave and sheath. They are related by Galilei transformation.

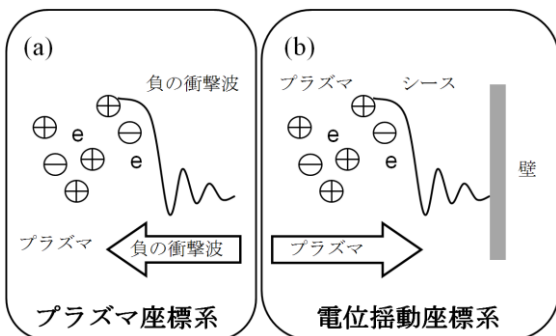


図 3 負イオンプラズマ中の衝撃波とシースの関係性。

Fig. 3 Negative-amplitude shock and sheath in negative ion plasma.

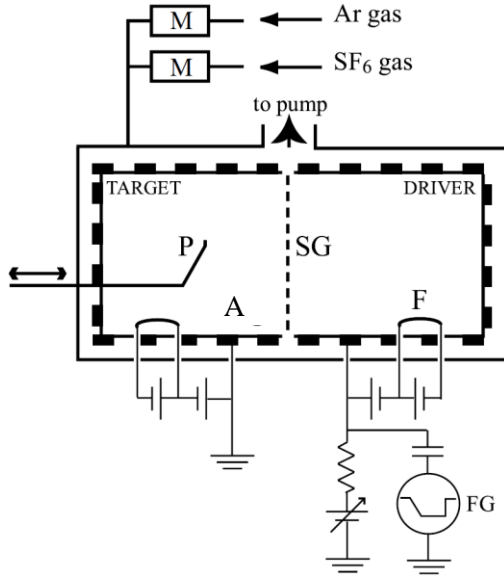


図4 ダブルプラズマ装置の概略図. A: 陽極, F: 熱陰極フィラメント, P: Langmuir プローブ, SG: セパレーショングリッド, M: マスフローコントローラ, FG: 波形発生器.

Fig. 4 Schematic of double plasma device. A: anode, F: hot cathode, P: Langmuir probe, SG: separation grid, M: mass flow controller, FG: function generator.

ンバー軸中心付近はほぼ無磁場である. チャンバー内は油拡散ポンプにより  $10^{-6}$  Torr 以下まで真空引きされている. Ar ガスを  $1-2 \times 10^3$  Torr で導入し,  $10^{-8} \text{ cm}^{-3}$  オーダーのプラズマを生成する. 放電電圧は 50 V である. このプラズマに微量の  $\text{SF}_6$  ガスを導入し,  $\text{Ar}^+$  正イオン,  $\text{F}^-$  負イオン, および電子からなる負イオンプラズマを生成する. 負イオン濃度  $r$  は  $\text{SF}_6$  ガスの導入量 (0-0.055 sccm) により制御が可能である. ドライバ領域とターゲット領域はセパレーショングリッドで仕切られており, グリッドを浮遊電位にすることにより 2つのプラズマは電氣的にほぼ絶縁される. これにより, 2つのプラズマ電位を独立に制御することが可能となる.

図5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, ターゲット側の正イオンの一部がドライバ側へ加速され, ターゲット側に一時的に負の密度揺動が生成される. 負の密度揺動の伝搬・緩和の様子を観測するため, セパレーショングリッドからの各点において Langmuir プローブを用いて電子飽和電流揺動の時間発展を検出した.

**〈3・2〉 実験結果** 図5(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電子飽和電流の時間発展である. 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, 負のイオン音波衝撃波と思われる振動構造が形成されることが分かる. 図6は, 励起した波動の規格化振幅  $\delta n_e/n_e$  およびマッハ数  $M$  の関係を示している. 波動の振幅は, 印加するランプ電圧の振幅により制御

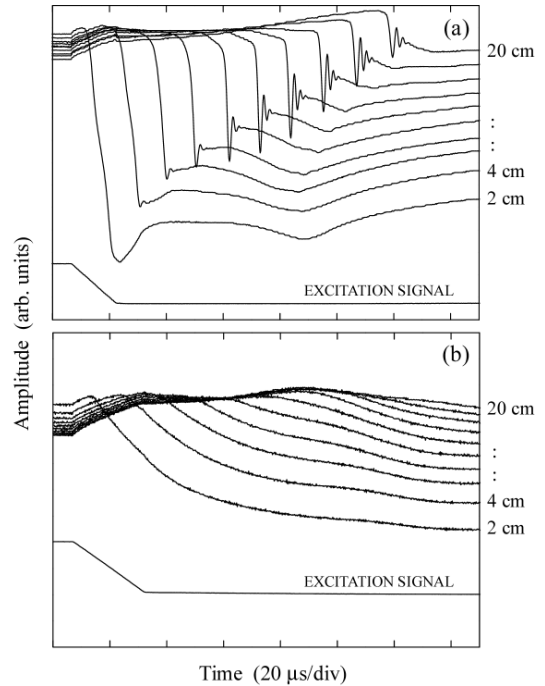


図5 負の密度揺動の発展. (a)  $r = 0.2$ . (b)  $r = 0$ . 右の距離はセパレーショングリッドからプローブまでの距離.  
Fig. 5 Time series of negative density fluctuation observed at several distance from the separation grid. (a)  $r = 0.2$ . (b)  $r = 0$ .

した. このプラズマの負イオン濃度を線形イオン音波の伝搬速度から見積もったところ  $r = 0.3$  であったが, 実験値は  $r = 0.4$  の理論値に一致している. この理論値は Sagdeev ポテンシャル理論から導出した値であるため, 散逸性の付加により振幅が理論値を下回る可能性はある. いずれにしても, 理論と実験はよく一致しており, 負の振動構造が負のイオン音波衝撃波であることを支持する証拠であるといえる.

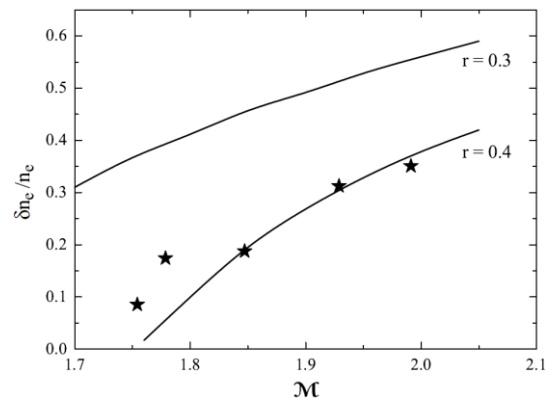


図6 規格化密度揺動とマッハ数の関係.  
Fig. 6 Normalized density fluctuation as a function of Mach number.

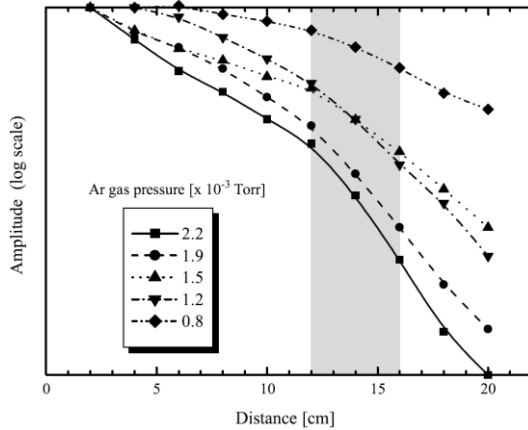


図7 各 Ar ガス圧における波動の減衰.

Fig. 7 Damping of wave amplitude for several Ar pressure.

図7は、負の振動構造の振幅の距離依存性を示しており、Ar ガス圧を変化させている。励起電圧は 1.7 V に固定しており、伝搬速度は各ガス圧で等しい。図より、ガス圧が高いほど減衰率が大きい傾向が分かる。従ってこの場合のエネルギー散逸機構はイオン-中性粒子衝突であると考えられる。しかし、セパレーショングリッドからの距離 12 cm 付近(灰色の領域)で減衰率が変化していることから、灰色の領域までは負の衝撃波の形成過程であり、そこから先がイオン-中性粒子衝突による減衰過程ではないかと考えられる。

他の散逸効果としては、衝撃波面での粒子の反射、Landau 減衰等が考えられる<sup>(10)</sup>。これらの効果も考慮に入れ、実験的および理論的に負の衝撃波の定常伝搬を検証する予定である。

## 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) F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Plenum Press, 1984, Chap. 8.
- (5) K. Koga and Y. Kawai, Jpn. J. Appl. Phys. 38, 1553 (1999).
- (6) K. Takizawa et al., Appl. Phys. Lett. 90, 011503 (2007).
- (7) H. Amemiya, J. Phys. D: Appl. Phys. 23, 999 (1990).
- (8) H. Shindo and Y. Horiike, Jpn. J. Appl. Phys. 30, 161 (1991).
- (9) A. Kono, J. Phys. D: Appl. Phys. 32, 1357 (1999).
- (10) Y. Saitou and Y. Nakamura, Phys. Plasmas 10, 4265 (2003).