# コンプレックスプラズマ中のダスト音波の伝播Ⅱ

## 中村良治,齋藤和史\*、石原 修

横浜国大・工、 \*宇都宮大・工

### I. はじめに

最近、実験室においてコンプレックスプラズマ(ダストプラズマ)の研究が盛んに 行われている. それらの成果については,いくつかの教科書やレヴュー論文で紹介 されている[1~6]. コンプレックスプラズマ中の微粒子の状態としては,結晶,液 体と気体がありえて,それらの中を伝播する波動が考えられる. 我々は,その波動 の一つであるダストイオン音波の非線形現象である衝撃波の観測を[7].しかし,ダ ストイオン音波では,波への微粒子の寄与は考慮されていないので,物理的により興 味があるのは,微粒子が振動するダスト音波である. それ故,ダスト音波を観測す るための装置を製作し,昨年度の本研究会で報告した[8]. その装置を用いて実験を 行うことによりダスト音波の伝播に成功したので,それについて報告する.

#### Ⅱ. 実験方法

実験は宇宙研から借用して横浜国大石原研究室に設置している YCOPEX 装置[9]を 用いて行った.装置の概略を1図に示す.パイレックスガラス管(G)は,長さ100cm で内径15cmである. このガラス管の左端がベローズ(B)に接続されている. ベ ローズは更に次々と液体窒素トラップ,バルブ,油拡散ポンプ,ロータリーポンプに 接続されている. このガラス管内に水平に厚さ2mmのステンレス板(P)(14.8mm x 90cm)が置かれていて,この板の下側にピエゾ素子ブザー(Z)が取り付けられて いる. ブザー内には直径5µmで2.6g/cm<sup>3</sup>の微粒子と直径2mmのガラスビーズが入 っている. ブザーの上部のステンレス板には直径1mmの穴が開けられている. ブ ザーに 5~15Vの直流電圧を印加すると2kHzで振動し,穴から微粒子が飛び出てく る. ステンレス板の両端の上部には微粒子を軸方向に閉じ込めるため,高さ2cmの ステンレス板(F)が立てられている. 径方向には,微粒子はガラス壁面に形成さ れているイオンシースによって閉じ込められる.

ガラス管内を先ずポンプと液体窒素トラップにより 10<sup>-3</sup>Pa まで排気した後にバル ブを閉じて、ニードルヴァルブを開けてアルゴンガスを管内に導入する. ガス圧は 約3Pa、プラズマは、13.56MHzの高周波(電力5W)を1図のようなリングではなく、 幅1cm で長さ 80cm のアルミ箔2枚を7cm 離してガラス管の背に平行に貼り、この2 枚を+側、ステンレス板を-側(接地側)として印加して生成された. このr f 放 電の方が1図のリングアンテナ放電よりもガラス管の軸方向に密度が均一なプラズ マ(電子密度=2x10<sup>8</sup> cm<sup>-3</sup>、電子温度=5eV)が生成された.

波の励起は、ステンレス板の右端から 20cm の位置に置いた高さ 2cm で幅 14cm のス テンレスメッシュ(透過率 81%)で行った. ステンレス板上、7~8mm の高さに浮 上している微粒子に円筒レンズによって水平方向に広げたグリーンレーザー (波長 532nm〉を照射する. 微粒子からの散乱光ヲガラス管の上から観測し, またデジタ ルカメラで記録する.

#### Ⅲ.実験結果と考察

浮遊している微粒子をガラス管の上から撮影した写真を図2に示す. 右端に近い 場所に見える白い縦線付近にグリッドがある. カメラはグリッドの真上にないので, グリッドは斜めに写っている. 左端近くに見える5本の縦線は,間隔が5mmで, 位置の較正のためステンレス板上に引いてある. (a)は,グリッド電圧が,OVの 時で,この時,プラズマ電位は+33Vであるので,プラズマに対しては,グリッド-33Vとなりグリッドの前面にイオンシースが形成されている. その前面から左側に 見える点状のものが微粒子である. 微粒子の先端部は,グリッドから約1cmの距 離にある. グリッドに-35Vを印加すると当然イオンシースの厚さが増加するので, 微粒子はグリッドから約2cm離れて浮いている〈2図(b)〉.

波の励起は、グリッド電圧を0からステップ的に-35V印加して行った. ステッ プ電圧を印加すると素早くグリッド前面の粒子は左に動く.その動きは粒子密度の高 い部分を形成する.その動きは波動ではなく、イオン音波をグリッドで励起した時に 観測されるイオンバーストと同じ現象である.それ故、アイオワ大学で行われた同様 の実験では、励起点からの距離が 5cm までで音速を測定しているが、ダスト音波では ないと[10]. この粒子バーストが徐々に波に変化していくので、ここではその密度 の高い部分がグリッドからの 8cm から 17cm まで動く時間を測定して波の伝播速度 を得た. 微粒子間の平均距離 d を変化させて測定した速度を3回に示す. ここで、 デバイ長λi は、イオン密度は電子密度に等しい、そしてイオン温度は 0.1eV と仮定 して求めた.

実験結果を理論と比較してみる. その一つがダスト音波(Dust Acoustic Wave)で, その音速 C<sub>DA</sub> は次式で与えられる[11].

 $C^{2}_{DA} = \omega^{2}_{PD} \lambda^{2}_{i} , \qquad \lambda_{i} << \lambda_{e}$  $= (4 \pi N_{d} Z^{2} e^{2} \lambda^{2}_{i}) / M, \qquad d^{3} N_{d} = 1$ 

ここで、N<sub>a</sub>, Ze と M は微粒子の密度, 電荷量と質量である.

微粒子は垂直方向には一層とみなしてそれが結晶構造を成していると仮定すると ダスト結晶波 (Dust LatticeWave)が可能で、その速度 Cnt は次式で与えられる[12].

 $C_{DL}^{2} = (Z^{2} e^{2}/dM) (2 + 2\kappa + \kappa^{2}) exp(-\kappa)$ 

$$\kappa$$
(格子パラメーター) = d/ $\lambda_i$ >> 1

実験値は、 $\kappa$ が小さい場合には、ダスト音波に、大きい時には結晶波に合っているいるように見える. その理由は、実験では、 $\kappa \approx 3.5$ では、垂直方向に約10層になっているが、 $\kappa$ を大きくしていくに従い層が薄くなり、 $\kappa \approx 6$ では一層になってしまうからだと考えられる

参考文献

- 1. P. K. Shukla and A. A. Mamun, *Introduction to Dusty Plasma Physics* (Institute of Physics Publishing, Bristol, U. K. 2002).
- 2. V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak, A. G. Khrapak and G. E. Morfill, Physics reports **421**, 1(2005).
- 3. V. Fortov, I. Iakubov and A. Khrapak, *Physics of Strongly Coupled Plasma* (Clarendon Press, Oxford, U. K. 2006).
- 4. O. Ishihara, J. Phys. D. Appl. Phys. 40, R121 (2007).
- 5. V. E. Fortov and G. E. Morfill(Eds), *Complex and Dusty Plasmas* (CRC Press, Boca Raton, USA, 2010).
- 6. V. N. Tsytovich, G. E. Morfill, S. S. V. Vladimirov and H. Thomas, *Elementary Physics of Complex Plasmas* (Springer, Berlin, 2008).
- 7. Y. Nakamura, Phys. Plasmas. 9, 440 (2002).
- 8. 中村良治, 當眞尚樹, 齋藤和史, 石原 修, スペースプラズマ研究会 (2010).
- 9. Y. Nakamura and O. Ishihara, Rev. Sci. Instrum. 79. 033504(2008).
- 10. J. B. Pieper and J. Goree, Phys. Rev. Lett. 77. 3137(1996).
- 11. 中村良治 J. Plasma and Fusion Research, 73, 1235(1997).
- 12. S. Ghosh, Phys. Plasmas 16, 103701(2009).



1図。実験装置の概略図



2図. ステンレス板上 に浮遊している微粒子. P=3.2Pa. W=5W. (a) Vg = 0V, (b) Vg=-35V.

3図. 測定された伝播速度
の微粒子の平均間隔 d 依存性.
λ<sub>i</sub>=0.17mm.
実践はダスト音波. 点線は
二次元結晶波の理論値.
P=3.2Pa. W=5W