## 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  $5\mu$  m で 2.6g/cm³ 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  $10^3$  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 3 Pa、プラズマは、13.56 MHzの高周波(電力 5 W)を 1 図のようなリングではなく、幅 1 cm で長さ 80 cm のアルミ箔 2 枚を 7 cm 離してガラス管の背に平行に貼り、この 2 枚を 1 似のような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=2 x  $10^8$  cm $^{-3}$ 、電子温度=5 eV)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、0 V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  $5 \, \mathrm{cm}$  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  $8 \, \mathrm{cm}$  から  $17 \, \mathrm{cm}$  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 図に示す. ここで、デバイ長  $\lambda_i$  は、イオン密度は電子密度に等しい、そしてイオン温度は  $0.1 \, \mathrm{eV}$  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  $C_{DA}$  は次式で与えられる[11].

$$C_{DA}^{2} = \omega_{PD}^{2} \lambda_{i}^{2}$$
,  $\lambda_{i} << \lambda_{e}$   
=  $(4 \pi N_{d} Z^{2} e^{2} \lambda_{i}^{2})/M$ ,  $d^{3}N_{d} = 1$ 

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.

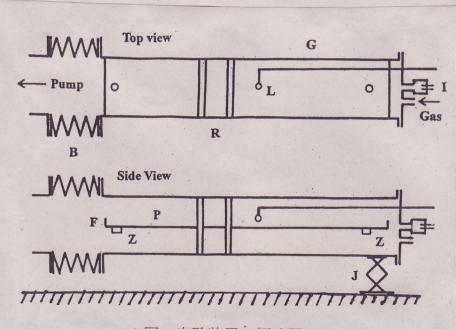
微粒子は垂直方向には一層とみなしてそれが結晶構造を成していると仮定すると ダスト結晶波 (Dust Lattice Wave)が可能で、その速度  $C_{DL}$  は次式で与えられる[12].

$$C_{DL}^2 = (Z^2 e^2/dM) (2 + 2 \kappa + \kappa^2) exp(-\kappa)$$
  $\kappa (格子パラメーター) = d/\lambda_i >> 1$ 

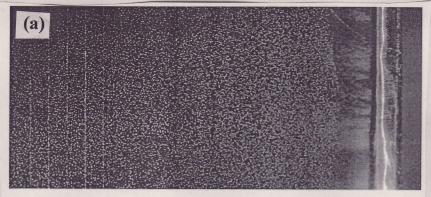
実験値は、 $\kappa$  が小さい場合には、ダスト音波に、大きい時には結晶波に合っているいるように見える。 その理由は、実験では、 $\kappa \approx 3.5$  では、垂直方向に約10 層になっているが、 $\kappa$  を大きくしていくに従い層が薄くなり、 $\kappa \approx 6$  では一層になってしまうからだと考えられる

### 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).

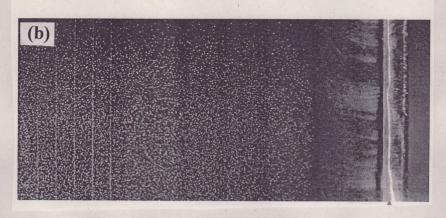


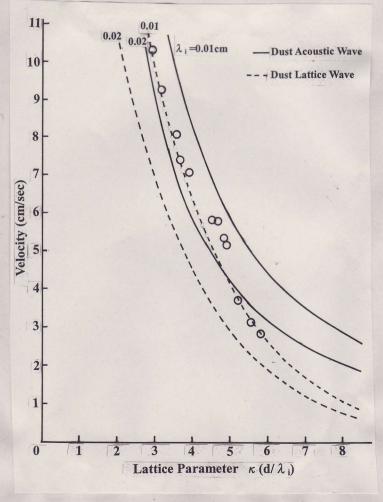
1図。実験装置の概略図



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)  $V_g = 0V$ ,
- (b)  $V_g = -35V$ .





3図. 測定された伝播速度 の微粒子の平均間隔 d 依存性.  $\lambda_i = 0.17$ mm.

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