



小特集 微小重力下の微粒子プラズマ研究—国際宇宙ステーション(ISS)における実験—

2. 微粒子(ダスト)プラズマについて

2. Basic Properties of Fine Particle (Dusty) Plasmas

東 辻 浩 夫
TOTSUJI Hiroo
岡山大学

(原稿受付：2015年4月27日)

本小特集の主役である微粒子(ダスト)プラズマについて、典型的なパラメータの値、微粒子の帯電、微粒子に働く力(重力、平均電場の力、不均一性による力、微粒子間相互作用、イオンドラッグ)などの基本的性質をまとめて簡単に紹介する。

Keywords:

fine particle (dusty) plasma, basic parameters and properties, forces on fine particles

2.1 組成、プラズマの生成・消滅

「微粒子(ダスト)プラズマ」とは、弱電離プラズマとミクロン程度の大きさの微粒子(ダスト)の混合物を指す。それぞれのパラメータのおおよその値は次のとおりである。荷電粒子系としてのプラズマの結合度は十分小さく、理想気体に近い(イオンの結合度 Γ は 10^{-3} – 10^{-2} 程度)。

プラズマ

ガス種	Ar, Ne, He など
ガス圧	数から数百 Pa
ガス温度	室温程度
電子・イオン密度	10^8 – 10^9 cm ⁻³ 程度
電子温度	1 – 数 eV
イオン温度	0.03 eV

微粒子

微粒子密度	10^4 – 10^5 cm ⁻³ 程度
微粒子温度	0.03 – 1 eV 程度

これらの値のうち、最も不定性が大きいのは微粒子温度である。中性ガス温度と同程度、したがって室温とする評価がある一方で、微粒子の運動の解析から得た値として少なくとも 1 eV 程度はある、とする論文もある。中性ガス原子の密度は 1 Pa あたり 10^{14} cm⁻³ 程度あり、微粒子と中性原子の衝突は頻繁であるが、微粒子質量が大きいために微粒子と中性原子との衝突によるエネルギー交換の周波数は 1 Pa あたり数 Hz 程度でありそれほど高くない[1]。また、いろいろの不安定性により微粒子の振動が励起される可能性があるため、熱運動を表す温度に対応するかは議論の余地があるが、高くても不思議ではない。

プラズマは多くの場合、RF または DC 放電によって生成

される。消滅は放電容器壁への拡散および微粒子表面での再結合によるとされる。後者は微粒子密度の大きな場合に消滅に寄与する。一方、プラズマ中の再結合の寄与は大きくないと考えられる。

電子・イオンからなる弱電離プラズマの分布は、プラズマ生成の方法にも依存するが、中心部を含むバルクプラズマと周辺のシース領域に分けられる。電気的には、バルクプラズマは電気的に擬中性でその中の電場は弱く、バルクプラズマの電位と周囲との電位差はシース領域の電場に対応する。シース領域ではイオン密度に比べて電子密度が低く、バルクプラズマから周辺に向かうイオンの流れがある。その速さはイオン音波の速度程度である。

2.2 微粒子の帯電

プラズマ中に微粒子を置くと、微粒子表面への電子電流とイオン電流により、微粒子は帯電する。電子とイオンの熱速度(平均速度)の違いにより、定常状態では微粒子は負に帯電する。帯電の大きさは表面への電子電流とイオン電流の釣り合いによって決まる。微粒子を球とし、電子・イオンの速度がそれぞれの温度のマックスウエル分布であるとすると、入射する電子・イオンの軌道から帯電量が求まる。これを OML (Orbital Motion Limited) 理論という[2]。

微粒子の電荷は負で、絶対値は電荷素量の 10^3 から 10^4 倍にもなる。このように巨大な(絶対値の)電荷をもち、微粒子間で強く相互作用する可能性があることが微粒子プラズマの大きな特徴である(荷電粒子系としての結合度 Γ は数百程度になり得る)。OML 理論への補正としてはイオン・中性原子衝突の効果が大きいと考えられている。この効果を考慮すると、OML 理論の値より小さくなる[3]。

Okayama University, OKAYAMA 700-8530, Japan

author's e-mail: totsuji-09@t.okadai.jp

2.3 微粒子に働く力と微粒子の分布

2.3.1 重力

微粒子は電子・イオンに比べて巨大な質量をもつので、重力場から大きな力を受ける。地表での大きさは微粒子の半径を $1\mu\text{m}$ とすると 10^{-13}N 程度である。ISS における重力の大きさは論文には陽に書かれていないようであるが地表の 10^{-4} 倍程度以下であると考えられる。

2.3.2 平均の電場からの力

微粒子は負電荷をもつから、電場から力を受ける。外場および平均の電荷分布による電場があれば、帯電した電荷との積に対応した力を受ける。プラズマは微粒子の電荷を遮蔽するが、この力は遮蔽の影響を受けない。

しかし、バルクプラズマ中では平均電場は弱く、地表で微粒子が受ける重力とは釣り合わない。プラズマに導入された微粒子は、バルクプラズマ中を落下して、シース領域の下向きの電場による力と重力が釣り合うところに浮遊して水平な層をなすことが多い。1層の2次元系になることも多い。

微小重力環境では、微粒子はバルクプラズマ中に浮遊できる。このときには、地上では重力の効果でみえなかった、ずっと小さい力の影響を大きく受ける。

2.3.3 プラズマの不均一性による力

プラズマが不均一な場合には、微粒子自身の周囲のシースのもつ（自由）エネルギーが微粒子の位置によって変化する。このため、その勾配と逆向きの力を受ける（分極力という）[4,5]。

2.3.4 微粒子間相互作用

微粒子は負に帯電するが、微粒子が周囲につくる電場はプラズマによって遮蔽される。遮蔽を最も簡単に扱くと、ポテンシャルは等方的な湯川（デバイ-ヒュッケル）型になる（2.3.2の力には遮蔽の効果はない）。

微粒子同士は近似的に湯川（デバイ-ヒュッケル）型斥力ポテンシャルにより相互作用をする。一方、これと同時に、微粒子による平均電荷密度の符号を反転した電荷密度（'shadow'）から湯川型の引力ポテンシャルが働く[5]。後者は前者による反発を平均として抑える効果をもつ。（一様で電氣的に中性な系では、微粒子同士は反発するように見えても全体としてはクーロン爆発をしないで閉じ込まっている。また、一様でない、したがって、電氣的中性が破れている系でも後者のポテンシャルが働くことが導かれる[5].）

一方、シースのようにイオンの平均流がある領域に微粒子があると、イオンの流れの影響を受ける（2.3.5参照）。微粒子の後方にイオンの軌道が収束するためにイオン密度の高い領域が生じ、微粒子の周りのポテンシャルはイオン

流の方向の電氣双極子による場が加わったものとなる。多くの地上実験で、微粒子が垂直に整列した鎖が観測されるのはこの効果であると考えられる。

微小重力環境において、微粒子がプラズマ中に浮遊した状態でイオン流の大きさ・向きにより電氣双極子を制御すると、可変な相互作用をもつ微粒子間の相互作用を制御できる異方的な相互作用をもつ微粒子系を得ることができる（4.3.2を参照）。

2.3.5 イオンドラッグとボイドの形成

微粒子に対するイオンの平均流（相対速度）があると、イオンがもつ運動量の一部が微粒子に移行する。微粒子に働く力として、これをイオンドラッグという。微粒子による吸収を含む個々のイオンと微粒子の衝突の解析、および、微粒子が有限な相対速度で動きながらプラズマを分極するときに微粒子が受ける力の解析、によってイオンドラッグの大きさは評価できる[6]。相対速度がイオンの熱速度程度まではイオンドラッグの大きさは近似的に相対速度に比例し、それを越えると近似的に相対速度に反比例する。PKE-Nefedov, PK-3 Plus で観測されたボイド（微粒子の存在しない閉領域）の形成はイオンドラッグの効果であるとされている[7]。

2.3.6 その他の力

電子または中性原子も微粒子に対して相対速度があれば電子ドラッグまたは中性ドラッグを及ぼす。しかし定常的な状態では、これらはイオンドラッグに比べて小さい[1]。

微粒子プラズマについては多数の論文があり、書籍[8,9]、総合報告[1,10-12]もある。ここで引用した論文などはそれらを網羅するものではない。

参考文献

- [1] 例えば, V.E. Fortov *et al.*, Physics Reports **421**, 1 (2005).
- [2] 例えば, J.E. Allen, Physica Scripta **45**, 497 (1992).
- [3] S. Khrapak *et al.*, Phys. Rev. E **72**, 016406 (2005).
- [4] S. Hamaguchi and R.T. Farouki, Phys. Rev. E **49**, 4430 (1994).
- [5] H. Totsuji, J. Phys. Soc. Japan, **84**, 064501 (2015).
- [6] A.V. Ivlev *et al.*, Phys. Rev. E **71**, 016405 (2005).
- [7] 例えば, J. Goree *et al.*, Phys. Rev. E **59**, 7055 (1999).
- [8] S.K. Shukla and A.A. Mamun, *Introduction to Dusty plasma Physics* (Institute of Physics Publishing, Bristol, 2002).
- [9] V.E. Fortov and G.E. Morfill (eds.), *Complex and Dusty Plasmas, From Laboratory to Space* (CRC Press, Boca Raton, 2010).
- [10] O. Ishihara, J. Phys. D **40**, R121 (2007).
- [11] P. Shukla and B. Eliasson, Rev. Mod. Phys. **81**, 25 (2009).
- [12] G.E. Morfill and A.V. Ivlev, Rev. Mod. Phys. **81**, 1353 (2009).