

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—

4. ISS における微粒子プラズマ実験の経過と主要な結果： PKE-Nefedov, PK-3 Plus から PK-4 へ

4. Microgravity Experiments on International Space Station (ISS): from PKE-Nefedov to PK-3 Plus and PK-4

東辻 浩夫¹⁾, 高橋 和生²⁾, 足立 聡³⁾

TOTSUJI Hiroo¹⁾, TAKAHASHI Kazuo²⁾ and ADACHI Satoshi³⁾

¹⁾岡山大学, ²⁾京都工芸繊維大学, ³⁾日本宇宙航空研究開発機構

(原稿受付: 2015年4月27日)

ISSの微小重力環境を利用した微粒子プラズマの実験が、実験装置 PKE-Nefedov で開始されて PK-3 Plus に引き継がれ、現在 PK-4 を用いて行われている。PKE-Nefedov および PK-3 Plus による実験の概要を説明する。

Keywords:

fine-particle (dusty) plasma, experiments on ISS, microgravity, PKE-Nefedov, PK-3 Plus, PK-4

4.1 ISS における微粒子プラズマ実験の意義

2章で述べたように、微粒子プラズマ中の微粒子系はクーロン類似相互作用をもち、強結合になり得る古典粒子系で、個々の粒子の振る舞いが容易に観測できる物理系としてユニークである。一方、最大の難点は微粒子が電子・イオンと比べて巨視的な質量をもつために重力の影響が大きいことであり、本来の3次元系の観測には微小重力環境が望ましい。

落下塔、ロケット、放物飛行で得られる微小重力環境の継続時間は限られているが、ISS上の実験装置では十分長時間の微小重力実験が可能である。実験結果は多数の論文になっており、総合報告[1,2]、書籍[3,4]もある。(中性ガスに重力と反対方向の温度勾配を与え、thermophoretic force と重力を釣り合わせることができる[5]。しかしその上で、様々な現象を観測するのは難しいようである。)

4.2 PKE-Nefedov

Sounding ロケット (TEXUS) による短時間の微小重力実験を経て、2001年に ISS (International Space station) 上に PKE-Nefedov と呼ばれる装置が設置され、ロシアとドイツのプロジェクトとして微小重力下の微粒子プラズマ実験 'Plasma Crystal Experiments' (ロシア語、ドイツ語でそれぞれ、'Плазма Кристал Эксперимент', Plasma Krystal Experiment) が開始された。PKE-Nefedov は図1のような大きさ・構造をもち、RF 放電によりプラズマを生成する。また、微粒子の種類は直径 $3.4\ \mu\text{m}$ および $6.8\ \mu\text{m}$ の2種類である[6]。2005年まで運用された PKE-Nefedov における主な実験結果は次のとおりである。

4.2.1 微粒子分布

平行平板型の放電容器内の全体的な微粒子分布の例が図2である。微粒子分布の大きな特徴は、中心部にボイド(微粒子のない閉じた空間)があり、微粒子のある領域とボイドとの境界付近の微粒子密度は明瞭な境界をもち階段状に変化していることである。また、一部に渦運動が観測されている[5]。 $3.4\ \mu\text{m}$ と $6.8\ \mu\text{m}$ の2種の微粒子が同時に存在するときには小さい方が内側に分布する。

4.2.2 微視的な構造

微粒子の微視的な構造として、それまでの地上実験で多くの場合に観測されていた微粒子が垂直(重力)方向の整列した鎖状の構造は観測されなかった。それに代わって、3次元のクーロン結晶が観測された。クーロン結晶の

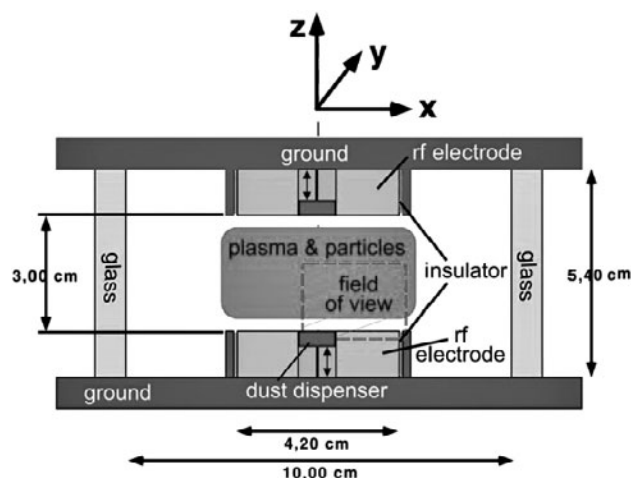


図1 PKE-Nefedov の主要部[6].

微視的構造には局所的に bcc 構造, fcc 構造があり, さらに hcp 構造があった. また, hcp 構造は AB 層の積層方向に格子面間隔が伸びたものであった. 図 3 にその例を示す [6]. 微粒子間の相互作用を湯川型とすれば bcc, fcc が基底状態になるパラメータ領域があるが, hcp は基底状態にはならない.

4.2.3 低周波の縦波の分散関係と微粒子電荷, 衝撃波

電極に数 Hz から数十 Hz の低周波の電位変化を与えることによって微粒子系の縦波が励起され観測された. 観測された波数 (振動数) の範囲では振動数は波数の平方根に比例する. 分散関係は理論と比較され, 一致しているとされた (図 4, 5) [7]. 直径 $3.4\ \mu\text{m}$ (SGC) および $6.8\ \mu\text{m}$ (LGC) に対する結果から微粒子の帯電量が評価された. 帯電量は帯電機構の OML 理論の結果と比較され, OML による値の数分の一程度まで少ないことがあることが示された. この原因はイオンと中性原子との衝突の効果とされた.

また, 中性ガス圧を瞬間的に増加することによる粒子密度の変化が伝搬する様子を調べ, ダスト音波の衝撃波をはじめ観測したとする論文もある [8].

4.2.4 ボイド中の電位分布

原因については追求していないが, ボイドとの境界にある直径 $3.4\ \mu\text{m}$ の微粒子がボイド中に運動する様子を追跡して, 微粒子に対するポテンシャルが調べられ, ボイドの中心で極小の結果が得られた (図 6). また, ボイド形成の原

因はイオンドラッグであることと矛盾しないと結論された [9].

4.2.5 微粒子間相互作用

一方, 帯電量とともに微粒子の基本的な特性の一つである微粒子間相互作用については, 地上実験で等方的な湯川型相互作用であるという結果が得られていたが [10], ISS では, PK-3 Plus を含めて, 直接の観測はなされていないよ

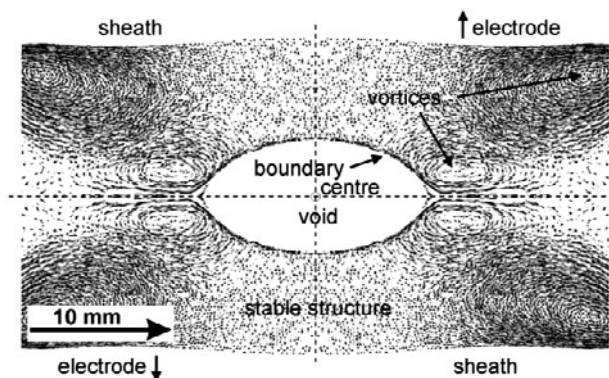


図 2 PKE-Nefedov における微粒子分布 [6].

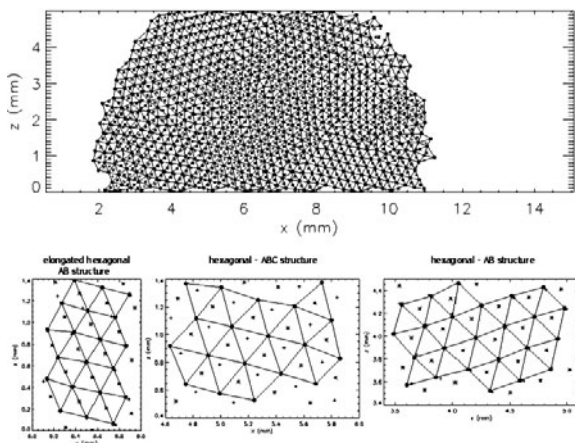


図 3 微粒子の 3 次元格子. bcc, fcc, および hcp 構造が見える (下段) [6].

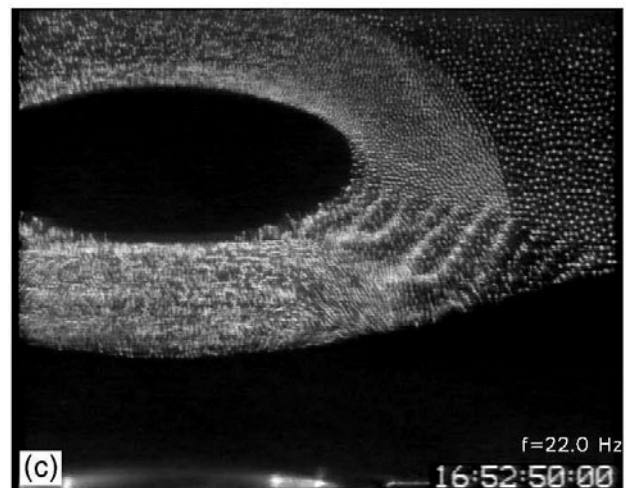
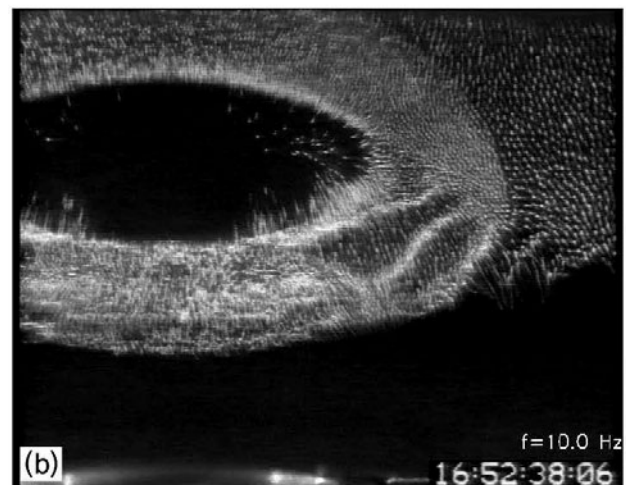
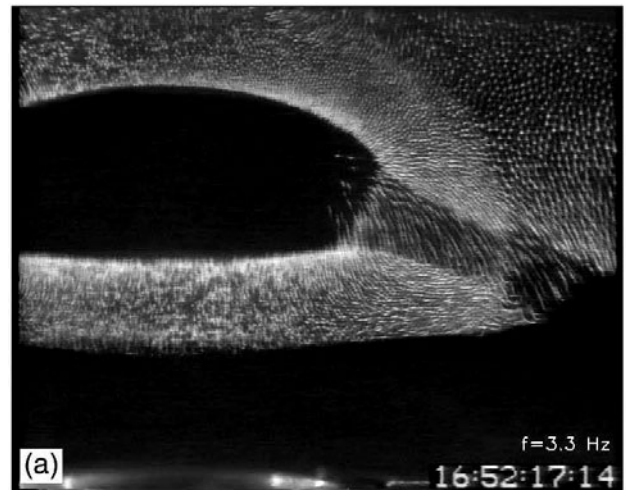


図 4 電極電位の低周波変化による圧縮波の励起 [7].

うである。PK-3 Plus においてと同じく、3次元の結晶構造の観測結果から、等方的な湯川型相互作用であるとしても矛盾がないことにより間接的に示されているだけである。地上と違い、微粒子を細かく操作することが難しいためと思われる。

4.3 PK-3 Plus

PKE-Nefedov の後継として、PK-3 Plus が2005年に設置された。実験は2006年から開始され、2013年まで運用された。PK-3 Plus の大きさ・構造は PKE-Nefedov に近いが、電

極を囲む接地されたガードリングがある。PK-3 Plus における主な実験結果は次のとおりである。

4.3.1 クーロン結晶（3次元）の構造と固液相転移

比較的小さな微粒子を用いて3次元系の融解と固化が観測された（図7）[11,12]。中性ガスの圧力により間接的に微粒子密度が制御された。ボイドの周りの微粒子分布の一部に着目して 10^4 程度の微粒子を含む領域が解析された。湯川系の相図と比較すると、圧力を下げると bcc 構造の領域で流体相との境界に向かって状態が変化したと考えられる。しかし、固体の構造としては、観測では hcp および fcc 構造が主であった。

4.3.2 異方性が電場によって制御できる荷電液体

微粒子に相対的なイオンの流れがあると、微粒子の後方にイオン密度が高い領域が形成されると考えられている。このため、微粒子とその周りのプラズマ分布は双極子モーメントをもち、微粒子同士は湯川型の相互作用に加えて、電気双極子による相互作用をするとされている。電場の極性を適当な周期で反転すると、電気双極子の向きが反転して双極子による相互作用は平均され、電気双極子の大きさの2乗に比例した、（微粒子が）流れの向きにそろい、垂直な向きに反発する相互作用をもつと考えられる。双極子相互作用の大きさはイオン流の振幅によって制御できるので、対向する電極に印可する電場によりイオンの流れを制御すると、制御できる異方性をもつ液体として振る舞うことが期待される。このことが実験によって検証された（図8）[13]。地上実験で微粒子が重力方向に整列すること

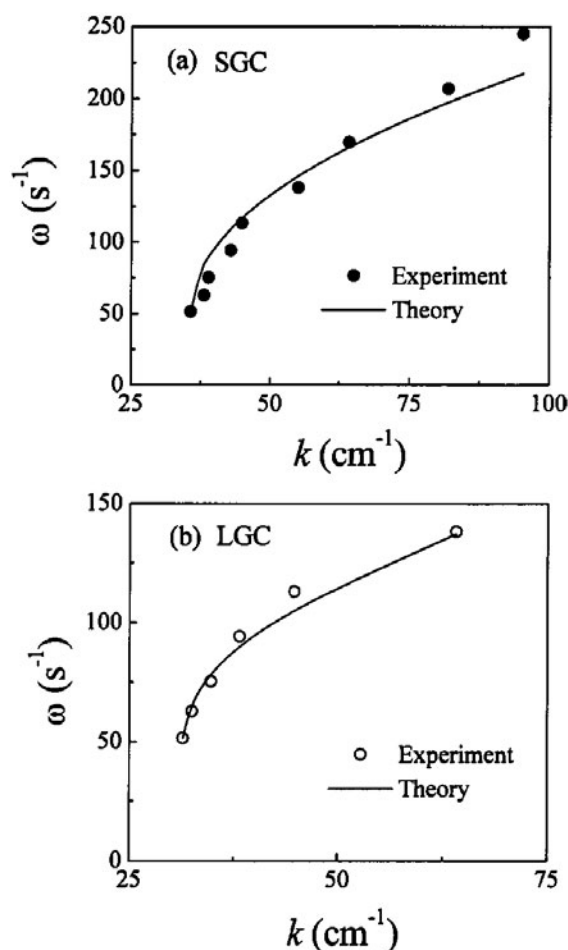


図5 小粒子群 (SGC) および大粒子群 (LGC) の圧縮波の分散関係[7].

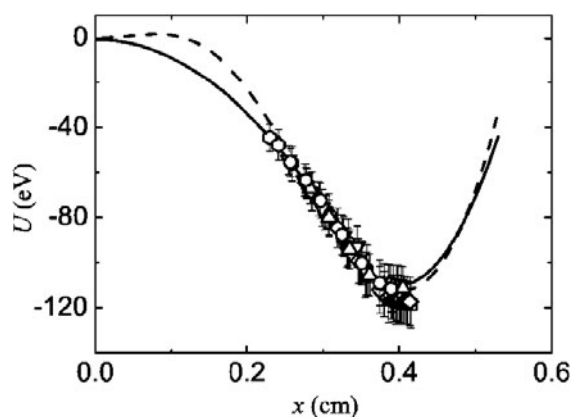


図6 ボイド中の微粒子に対するポテンシャル[9].

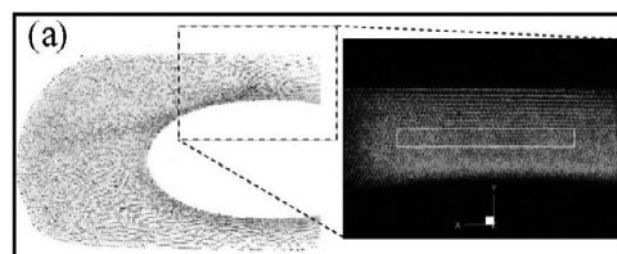


図7 (a) 液相・気相転移を観測した領域[12].

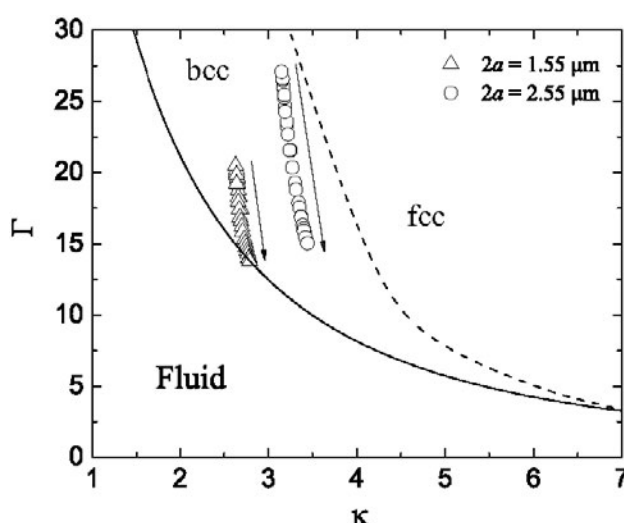


図7 (b) パラメータ空間における変化[12].

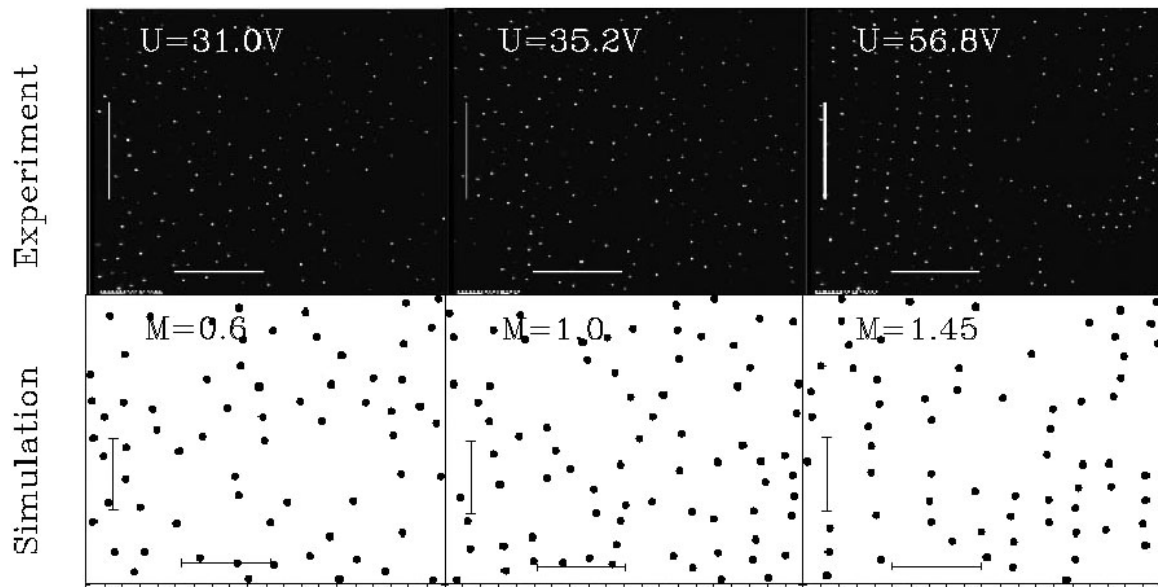


図8 イオン流速の大きさによる非等方相互作用の制御[13].

が観測されており、これは微粒子がイオン流を後方に収束させる効果によるとされている。イオン流の制御により異方性を変化できることは、このことの間接的な証明になっている。

4.3.3 レインフォーメーション

全体として静止した微粒子集団に、別の微粒子集団がある平均速度をもって衝突するとき、個々の微粒子同士が衝突しながら互いに拡散する状態から、侵入する微粒子が侵入方向に列をつくって侵入する状態に変化することがある。これをレインフォーメーション (lane formation) という。半径の異なる微粒子集団を別々の所につくり、侵入させてレインフォーメーションを観察した (図9) [14]。はじめ別々の所につくるのは、半径の異なる微粒子は通常混合しないことを利用している。

4.3.4 ハートビート不安定性

パラメータがある組み合わせをとるとき、ボイドを含むプラズマ全体が1–10 Hz程度の振動数で変化し、ボイドが心臓の鼓動のように膨らんだり縮んだりすることがある。これをハートビート不安定性という。グローの変化を伴うから電離度の変動があるはずであるが、振動の機構については理解されていない[15, 16]。

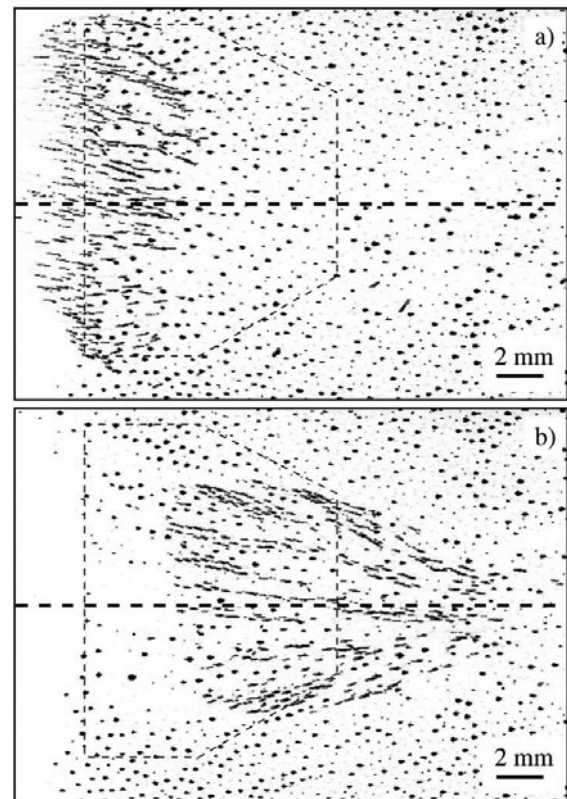


図9 レイン形成。大粒子 (半径 9.2 mm/2) 群の中に入る小粒子 (半径 3.4 mm/2) 群[14].

参考文献

- [1] V.E. Fortov *et al.*, Phys. Rep. **421**, 1 (2005).
- [2] G.E. Morfill and A.V. Ivlev, Rev. Mod. Phys. **81**, 1353 (2009).
- [3] P.K. Shukla and A.A. Mamun, *Introduction to Dusty Plasma Physics* (Institute of Physics, Bristol, 2002).
- [4] V.E. Fortov and G.E. Morfill (eds.), *Complex and Dusty Plasmas* (CRC Press, Boca Raton, 2010).
- [5] O. Arp *et al.*, Phys. Plasmas **12**, 122102 (2005).
- [6] A.P. Nefedov *et al.*, New J. Phys. **5**, 33 (2003).
- [7] V.V. Yaroshenko *et al.*, Phys. Rev. E **69**, 066401 (2004).
- [8] D. Samsonov *et al.*, Phys. Rev. E **67**, 036404 (2003).
- [9] M. Kretschmer *et al.*, Phys. Rev. E **71**, 056401 (2005).
- [10] U. Konopka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 891 (2000).
- [11] S. Khrapak *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 205001 (2011).
- [12] S. Khrapak *et al.*, Phys. Rev. E **85**, 066407 (2012).
- [13] A.V. Ivlev *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 095003 (2008).
- [14] K.R. Suetterlin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 085003 (2009).
- [15] R. Heidemann *et al.*, Phys. Plasmas **18**, 053701 (2011).
- [16] M.Y. Pustynnik *et al.*, Phys. Plasmas **19**, 103701 (2012).