

平成22年5月20日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19340173
 研究課題名（和文） 極低温環境下におけるコンプレックスプラズマの研究
 研究課題名（英文） Study of Complex Plasma under Cryogenic Condition
 研究代表者
 石原 修（ ISHIHARA OSAMU ）
 横浜国立大学・工学研究院・教授
 研究者番号：20313463

研究成果の概要（和文）：プラズマ中に微粒子を含む系はコンプレックスプラズマと呼ばれる。コンプレックスプラズマの新しい物性として、帯電微粒子とプラズマの相互作用により生まれる物性を研究した。また、これまで例のなかった極低温環境下でのプラズマ生成を試み、プラズマ中に微粒子を注入して、極低温コンプレックスプラズマとして、新たな物理現象の研究に取り組んだ。帯電状態、シース中での動的挙動が明らかにされた。

研究成果の概要（英文）：Cryogenic complex plasma has been studied experimentally and theoretically. Plasma was successfully produced in various methods under cryogenic temperature. Some of the new findings including charging of dust particles were reported.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,800,000円	2,340,000円	10,140,000円
2008年度	5,400,000円	1,620,000円	7,020,000円
2009年度	2,800,000円	840,000円	3,640,000円
年度			
年度			
総計	16,000,000円	4,800,000円	20,800,000円

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ物理

キーワード：コンプレックスプラズマ

1. 研究開始当初の背景

- (1)平成16年3月にコンプレックスプラズマ実験室を立ち上げ、その後コンピュータ環境も整備。
- (2)デュワ瓶を使い、液体ヘリウム蒸気中でプラズマを安定に生成するための電極構造に工夫を凝らした。

2. 研究の目的

極低温環境下でコンプレックスプラズマの物性を明らかにし、帯電微粒子とプラズ

マの相互作用を調べる。

3. 研究の方法

液体ヘリウム蒸気中に設置した針電極に、電圧を加え、放電によりプラズマを生成する。液体ヘリウム表面近傍でプラズマが存在するために、液体ヘリウムは減圧冷却により超流動の状態にする必要がある。プラズマ中に微粒子を注入して帯電微粒子とプラズマが共存するコンプレックスプラズマを作り出す。

4. 研究成果

(1) 液体ヘリウム冷却装置 YD-1 (高さ 1 m、2 重のデュワ瓶で、内径 10 cm) では、ガラス管の中にヘリウムガスを入れ、RF 放電により生成されたプラズマの周りを液体ヘリウムで冷やし、プラズマ中に注入された微粒子の帯電量を測定する方法を開発した。帯電微粒子が、シース電場の中で浮遊する動的な現象を明らかにした。

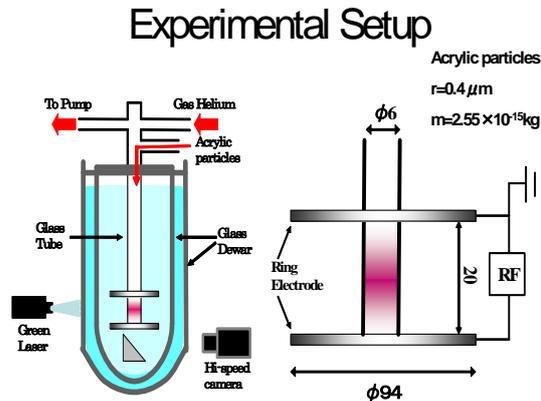


図 1. YD-1 装置 ガラス管の中で生成されたプラズマが周囲の液体ヘリウムで冷やされる。液体ヘリウムの代わりに液体窒素または常温の空気を入れることで、プラズマ中の中性粒子温度を制御できる。

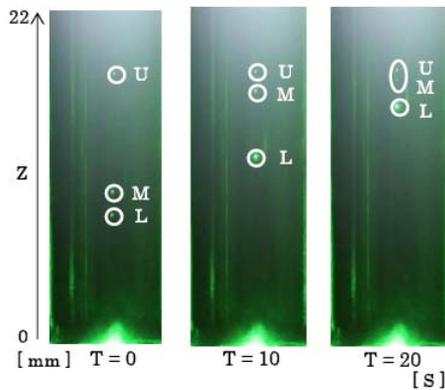


図 2. シース中を上昇する 1 ミクロンの微粒子。微粒子はレーザーに照射されてプラズマ中で光る。U は upper, M は Middle, L は Lower をあらわし、3 つの粒子の位置を示す。

(2) YD-1 より一回り大きな YD-2 装置 (高さ 1m、内径 16 cm の 2 重のガラスデュワ瓶) では液体ヘリウム蒸気中でプラズマを RF 放電により生成して、そこに直接微粒子を投入した。微粒子の帯電が確認され、帯電量の測定に成功した。

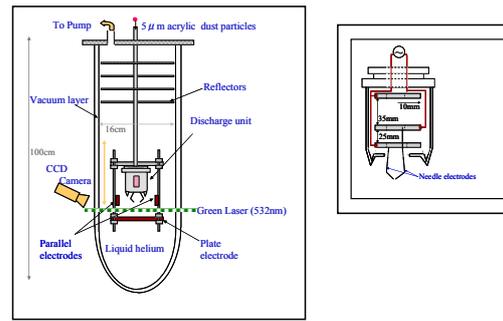


図 3. YD-2 装置 液体ヘリウムの上部に設置された電極の間に出夏を加え、蒸気中で生成されたプラズマの中に微粒子を投入し微粒子を帯電させる。帯電微粒子は重力により落下して液体ヘリウム表面に落下する。

(3) 線形コンプレックスプラズマ実験装置 YCOPEX (パイレックス、前長 1 m、内径 16 cm) を開発。ガラス真空管の中にステンレス板を置き、プラズマを RF 放電により生成し、ステンレス上にできるシース境界領域に 2 次元の微粒子群を浮遊させて、微粒子の集団運動を研究した。

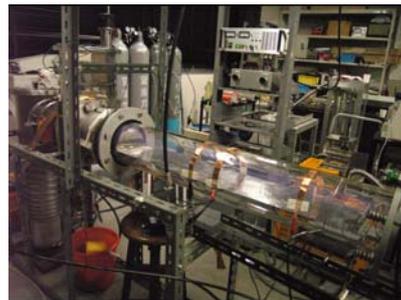


図 4. YCOPEX パイレックス放電管。ガラス管外部に巻かれた二つのリング状電極を使い、放電し、プラズマを生成する。



図 5. YCOPEX 内に広がるアルゴンプラズマ。中に水平に設置されたステンレス板 (ガラス管の下方に黒く見える) 上にシースができる。ガラス管内に設置された微粒子供給装置から吐き出される微粒子がシースープラズマ境界面に浮遊する。

(4) 分子運動論に基づくコンピュータシミュレーションにより、プラズマ中の帯電微粒子が作るさまざまな構造を明らかにした。微粒子は、プラズマ中で帯電し、プラズマが中性を保とうとする性質により、プラズマ内で閉じ込められる。

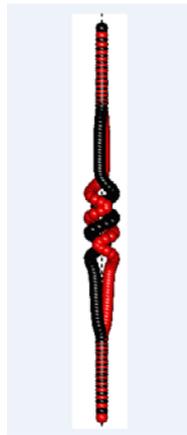


図6. シミュレーションが明らかにした微粒子がプラズマ中でつくるらせん構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- ① M. Shindo, N. Uotani and O. Ishihara, Dust charge in collisional plasma in liquid helium vapor, *Journal of Plasma and Fusion Research Series* **8**, 65-68 (2009). 査読有
- ② A. Tsushima and O. Ishihara, Electron acceleration by oscillating electric field, *Journal of Plasma and Fusion Research Series* **8**, 294-297 (2009). 査読有
- ③ W. Sekine, O. Ishihara and M. Rosenberg, Dust dynamics in cryogenic environment, *Journal of Plasma and Fusion Research Series* **8**, 290-293 (2009). 査読有
- ④ J. Kubota, C. Kojima, W. Sekine and O. Ishihara, Coulomb cluster in a plasma under cryogenic environment, *Journal of Plasma and Fusion Research Series* **8**, 286-289 (2009). 査読有
- ⑤ Y. Tomita, T. Yamada, O. Ishihara, Charging of Dust Particles in Magnetic Field, *Journal of Plasma and Fusion Research Series* **8**, 273-276 (2009). 査読有
- ⑥ Y. Nakamura and O. Ishihara, Measurements of electric charge and screening length of micro-particles, *Physics of Plasmas*, **16**, 043704-1-043704-5 (2009). 査読有
- ⑦ Y. Hayashi, K. Takahashi, H. Totsuji, O. Ishihara, S. Hamaguchi, N. Sato, Y. Watanabe, S. Adachi, and M. Takayanagi, Experiments of fine particle plasmas for observation of critical phenomena, *Proceedings of Third International Symposium on Physical Science in Space 2008*, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* **25**, 349-352 (2008). 査読有
- ⑧ C. Kojima, J. Kubota, Y. Tashima, and O. Ishihara, Dust Dynamics in Wake Channel, *Proceedings of Third International*

Symposium on Physical Science in Space 2008, *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* **25**, 353-356 (2008). 査読有

- ⑨ Y. Nakamura and O. Ishihara, A Complex Plasma Device of Large Surface Area, *Review of Scientific Instruments* **79**, 033504-1-033504-4 (2008). 査読有
- ⑩ T. Kamimura, Y. Suga and O. Ishihara, Configurations of Coulomb Clusters in Plasma, *Physics of Plasmas* **14**, 123706-1 - 123706-11 (2007). 査読有
- ⑪ O. Ishihara, Complex Plasma : Dusts in Plasma, *Journal of Physics D: Appl. Phys.* **40**, R121-R147 (2007). 査読有

〔学会発表〕(計 67 件)

1. 米澤逸人, 瀬戸章, 上村鉄雄, 齋藤和史, 中村良治, 石原修, 帯電微粒子超音速流のシミュレーション, 日本物理学会第 65 回年次大会 (岡山大学, 2010. 3. 20-23). 23pTJ-5
2. 林康明, 高橋和生, 東辻浩夫, 石原修, 三重野哲, 上村鉄雄, 佐藤徳芳, 渡辺征夫, 足立聡, 高柳昌弘, 国際宇宙ステーションにおける微粒子プラズマ実験, 第 26 回宇宙利用シンポジウム, (宇宙航空研究開発機構, 相模原, 2010. 1. 25 - 26) .
3. A. Seto, T. Kamimura, Y. Saitou, Y. Nakamura and O. Ishihara, Simulation on Void Structure in the Flow of Dust Particles, 10th Workshop on fine particle plasmas (NIFS, Toki, Japan, Nov. 26-27, 2009).
4. M. Ueno, J. Kubota and O. Ishihara, Rotation of a dust cluster in a plasma with magnetic field at cryogenic temperature, *ibid.*
5. M. Chikasue, N. Uotani, K. Takakura, M. Shindo and O. Ishihara, Thermal effect on charged dust particles in a plasma under cryogenic condition, *ibid.*
6. K. Takakura, N. Uotani, M. Chikasue, J. Kubota and O. Ishihara, Charged dust particles in diffused plasma on liquid surface, *ibid.*
7. Y. Saitou, Y. Nakamura, and O. Ishihara, Interaction of the flow of dust particles in a plasma with a biased obstacle, *ibid.*
8. N. Uotani, J. Kubota, M. Chikasue, W. Sekine, M. Shindo and O. Ishihara, Dust grain charging in a collisional plasma under cryogenic temperature, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (Aomori, Japan, Oct. 27-30, 2009).
9. W. Sekine and O. Ishihara, Cryogenic effect on dust grain charging in a plasma, *ibid.*
10. 関根航, 石原修, 極低温下コンプレックスプラズマ中の微粒子の帯電量評価, 日本

- 物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学, 平成 21 年 9 月 25 日-28 日) 26pYL-3.
11. 魚谷夏子、眞銅雅子、石原修、液体ヘリウム蒸気中での微粒子の帯電変化測定実験、日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学, 平成 21 年 9 月 25 日-28 日) 26pYL-1.
 12. 久保田潤平、上野昌史、田島祐輝、関根航、石原修、磁場中微粒子群の回転運動に対するプラズマ温度依存性、日本物理学会 2009 年秋季大会 (熊本大学, 平成 21 年 9 月 25 日-28 日) 26pYL-2.
 13. 瀬戸章、上村鉄雄、齋藤和史、中村良治、石原修、帯電微粒子流におけるボイド構造のシミュレーション、*ibid.*, 26pYL-8.
 14. 齋藤和史、中村良治、石原修、微粒子流中におかれた障害物の下流における微粒子の振る舞い、*ibid.* 26pYL-7.
 15. Y. Tomita, G. Kawamura, O. Ishihara, and D. Tskhakaya, Absorption Cross-section of Plasma Particles to Spherical Probe in Weak Magnetic Field, 8th International Workshop on Electric Probes in Magnetized Plasmas (Innsbruck, Sep. 21 – Sep. 25, 2009).
 16. O. Ishihara, Cryogenic Complex Plasma Experiment, International Symposium on Cutting Edge Plasma Physics (ICTP (The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics), Trieste, Italy, 24-28 August, 2009) (Invited Talk)
 17. 石原修、現代プラズマ科学の最前線～学際連携によるプラズマ理工学のさらなる展開、日本物理学会第 64 回年次大会 (立教大学, 平成 21 年 3 月 27 日 – 30 日) 29pXB-1
 18. 齋藤和史、中村良治、小島力、石原修、微粒子プラズマ乱流生成の試み、日本物理学会第 64 回年次大会 (立教大学, 平成 21 年 3 月 27 日 – 30 日) 28pSP-5
 19. 中村良治、石原修、コンプレックス・プラズマの微粒子の電荷量と遮蔽長の測定 II, 平成 20 年度スペース・プラズマ研究会 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部、相模原, 平成 21 年 3 月 5 – 6 日) pp. 88–91.
 20. Y. Hayashi, S. Iizuka, O. Ishihara, H. Totsuji, S. Adachi, T. Mieno, T. Masuzaki, T. Mukai, N. Sato, and Y. Watanabe, Planning of research project on fine particle plasmas, 9th Workshop on fine particle plasmas (NIFS, Toki, Japan, Dec. 18-19, 2008).
 21. N. Uotani, M. Shindo and O. Ishihara, Transition from dust charging in a plasma to decharging in helium gas, *ibid.*
 22. Y. Tomita, G. Kawamura, T. Yamada and O. Ishihara, Charging of dust particles in weak magnetic field, *ibid.*
 23. W. Sekine and O. Ishihara, Charged dust particles on the surface of liquid helium, *ibid.*
 24. K. Abe, C. Kojima, J. Kubota, and O. Ishihara, Variation of a macroscopic physical quantity in the presence of dust particles in a plasma, *ibid.*
 25. C. Kojima, J. Kubota, K. Abe and O. Ishihara, Charged dust floatation on the surface of liquid helium, *ibid.*
 26. J. Kubota, C. Kojima, K. Abe and O. Ishihara, Dust charge in a plasma surrounded by cryogenic liquid, *ibid.*
 27. 齋藤和史, 石原修, 中村良治, 2 次元的な微粒子の挙動, 宇宙関連プラズマ研究会 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 (JAXA/ISAS) 相模原市, 2008. 12. 16)
 28. Y. Tomita, G. Kawamura and O. Ishihara, Charging of positively charged dust particle in weak magnetic field, P2-56, The 18th International Toki Conference (Ceratopia Toki, Toki Gifu JAPAN, December 9-12, 2008)
 29. 溝端洋平, 石原修他、マグネトロンプラズマを用いた微粒子プラズマ実験、日本マイクログラビティ応用学会 (J A S M A) 京都大学, 2008.11.25-26.
 30. 関根航、石原修、Marlene Rosenberg, 極低温環境下における微粒子とプラズマの相互作用, 日本物理学会 2008 年秋季大会 (岩手大学, 平成 20 年 9 月 20 日-23 日) 21pZB-11
 31. 久保田潤平、小島力、関根航、中村良治、石原修、極低温環境におけるプラズマ中の微粒子の帯電量, 日本物理学会 2008 年秋季大会 (岩手大学, 平成 20 年 9 月 20 日-23 日) 21pZB-10
 32. O. Ishihara and T. Kamimura, Dust Structures in Complex Plasma, Satellite Meeting on Plasma Physics and Advanced Applications in ASO, ASO Ikoi-no-Mura, Aso, Kumamoto, Japan September 12-14, 2008. (Invited talk)
 33. M. Shindo, N. Uotani and O. Ishihara, Dust charge in collisional plasma in liquid helium vapor (International Congress on Plasma Physics 2008, Fukuoka, Japan, September 8-12, 2008). FD • P3-032, p. 325.
 34. W. Sekine, O. Ishihara and M. Rosenberg, Dust dynamics in cryogenic environment *ibid.*, FD • P3-031, p. 325.
 35. J. Kubota, C. Kojima, W. Sekine and O. Ishihara, Observation of dusts structure in cryogenic environment, *ibid.*, FD • P3-029, p. 324.

36. Y. Tomita, T. Yamada, O. Ishihara, Charging of Dust Particles in Magnetic Field, *ibid.*, FD · P1-082, p. 105.
37. A. Tsushima and O. Ishihara, Electron acceleration by oscillating electric field, *ibid.*, FB · P1-002, p.67.
38. O. Ishihara, Complex Plasma Research under Extreme Conditions, Fifth International Conference on Physics of Dusty Plasma (ICDPD5) (Ponta Delgada, Azores, Portugal, May 18-21, 2008) (Invited talk)
39. J. Kubota, C. Kojima, W. Sekine and O. Ishihara, Dust Charge in Cryogenic Environment, Fifth International Conference on Physics of Dusty Plasma (ICDPD5) (Ponta Delgada, Azores, Portugal, May 18-21, 2008). Book of Abstracts, p. 107.
40. Y. Hayashi, K. Takahashi, H. Totsuji, O. Ishihara, N. Sato, Y. Watanabe and S. Adachi, Ordering of Fine Particles in a Planar Magnetron Plasma, *ibid.*, p. 97.
41. 石原修, コンプレックスプラズマにおける微粒子の挙動、海洋研究開発機構「階層構造の科学」研究会（神奈川県箱根湯河原温泉おんやど恵, 2008年3月28日—3月29日）（招待講演）
42. 中村良治, 石原修, 微粒子に及ぼす中性粒子抵抗力の測定、平成19年度スペース・プラズマ研究会（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部、相模原、平成20年3月27—28日）pp. 94-98.
43. 久保田潤平、小島力、石原修、極低温環境におけるプラズマ中のダストの帯電量、*ibid.*, pp. 78-81.
44. 関根 航, 石原 修, Marlene Rosenberg, 極低温下のコンプレックスプラズマ物理に対する理論的考察, 日本物理学会第63回年次大会（近畿大, 平成20年3月22日—26日）24pRE-9.
45. 眞銅雅子, 福田雄介, 細井信宏, 石原修, 液体ヘリウム蒸気中のプラズマで帯電した微粒子の帯電量測定, *ibid.* 24pRE-8.
46. 須賀裕太, 上村鉄雄, 石原修, 帯電微粒子群が形成するヘリカル構造, *ibid.* 24pRE-7.
47. 足立聡, 石原修他, 平成19年度ワーキンググループ活動報告—次期実験装置PK-4を利用した微小重力実験計画検討, 第24回宇宙利用シンポジウム、[相模原] 2008年1月17日~1月18日).
48. 三重野哲, 石原修他, プラズマ中微粒子の合成・拡散・構造化（ワーキンググループ活動報告）、第24回宇宙利用シンポジウム、[相模原] 2008年1月17日~1月18日.
49. 林康明、石原修他、微小重力環境下微粒子プラズマ研究の展開、第24回宇宙利用シンポジウム、[相模原] 2008年1月17日~1月18日.
50. M. Shindo, Y. Fukuda, N. Hosoi and O. Ishihara, Measurement of dust charge attached in a plasma with high gas pressure, 8th Workshop on fine particle plasmas (NIFS, Toki, Japan, Dec., 20-21, 2007). P-16.
51. J. Kubota, C. Kojima and O. Ishihara Moving dust particles up with damped oscillation in the sheath, *ibid.* P-15.
52. C. Kojima, K. Mita, J. Kubota, Y. Tashima, and O. Ishihara, Observation of random motion of charged dust particles in a cryogenic plasma, *ibid.*. P-14.
53. W. Sekine and O. Ishihara, Diffusion process of dust particle in cryogenic environment, *ibid.*. P-13.
54. Y. Suga, T. Kamimura, O. Ishihara, Helical Structures Formed by Charged Dust Particles, *ibid.*. P-11.
55. Y. Nakamura and O. Ishihara, Measurement of Neutral Drag Force on Microparticles, *ibid.*. O-6.
56. 三田克敏, 小島力, 久保田潤平, 田島祐輝, 石原 修, クーロン結晶における極低温環境下のプラズマの影響, プラズマ・核融合学会24回年会（姫路, 2007年11月27日—30日）29pB23P
57. 小島力, 久保田潤平, 石原 修, シース中をイオン風に逆らって進む微粒子の観測, プラズマ・核融合学会第24回年会（姫路, 2007年11月27日—30日）29pB22P
58. 山田貴敏, 富田幸博, 石原修, 一樣弱磁場中の球形ダストへの荷電粒子の吸収, プラズマ・核融合学会第24回年会（姫路, 2007年11月27日—30日）29pB24P
59. Y. Hayashi, O. Ishihara et al., Experiments of fine particle plasmas toward observation of critical phenomena, Third International Symposium on Physical Sciences in Space, Nara, Japan, Oct. 22-26, 2007).
60. S. Adachi, O. Ishihara et al., Experimental investigation on conditions of microgravity experiment for critical point in dusty plasmas, *ibid.*
61. C. Kojima, J. Kubota, Y. Tashima and O. Ishihara, Dust dynamics in wake channel, *ibid.* .
62. 関根航, 石原修, 極低温環境下におけるダスト微粒子群の拡散過程, 日本天文学会年会（岐阜大学, 平成19年9月26日—28日）. A0090a.

63. 須賀裕太, 上村 鉄雄, 石原 修,
ダスト微粒子が形成するクーロン結晶
シミュレーション日本物理学会第 62 回
年次大会(北海道大学, 平成 19 年 9 月 21
日-24 日). 22pRS-2.
64. 福田雄介, 細井信宏, 眞銅雅子, 石
原修, 液体ヘリウム表面近傍に形成される
帯電微粒子群の構造 II, *ibid.* 22pRS-1.
65. O. Ishihara, The Structure Formation of
Coulomb Clusters, Summer College on
Plasma Physics, Abdus Salam International
Centre for Theoretical Physics. August 20
-24, 2007, Trieste, Italy (Invited talk).
66. W. Sekine and O.Ishihara, Cold dust
cluster in the liquid helium environment,
The 9th International Workshop on the
Interrelationship between Plasma
Experiments in Laboratory and Space, Palm
Cove Resort, Cairns, Australia, 5th - 10th
August 2007.
67. O. Ishihara and T. Kamimura,
Configurations of Coulomb Clusters in
Complex Plasma, *ibid.* (Invited talk).

[図書] (計 6 件)

- ① O. Ishihara, *et al.*, Experiments on
Cryogenic Complex Plasma, in
“*New Developments in Nonlinear
Plasma Physics*,” ed. by B. Eliasson
and P.K. Shukla, AIP Conf. Proc.
(New York, 2009), pp.110-126.
- ② M. Shindo and O. Ishihara, *Study of
Complex Plasmas*, in Nano- and
Micromaterials, ed. by K. Ohno, M.
Tanaka, J. Takeda, and Y. Kawazoe
(Springer Berlin Heidelberg, 2008),
Chap. 13, pp. 313-327.
- ③ O. Ishihara, Complex Plasma Research
under Extreme Conditions, in
Multifacets of Dusty Plasmas, edited
by J.T. Mendonça, *et al.* AIP
Conference Series, vol. 1041
(Melville, N.Y. : AIP, 2008) pp.
139-142.
- ④ J. Kubota, C. Kojima, W. Sekine and
O. Ishihara, Dust Charge in Cryogenic
Environment, Multifacets of Dusty
Plasmas, edited by J.T. Mendonça, D.
P. Resends and P. K. Shukla, (Melville,
N.Y. : AIP, 2008) pp. 235-236.
- ⑤ Y. Hayashi, K. Takahashi, H. Totsuji,
O. Ishihara, N. Sato, Y. Watanabe and
S. Adachi, Ordering of Fine Particles
in a Planar Magnetron Plasma, *ibid.*,
pp. 221-222.
- ⑥ O. Ishihara, Complex Plasma Research
under Extreme Conditions, *ibid.*, pp.

139-142.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 修 (ISHIHARA OSAMU)
横浜国立大学・工学研究院・教授
研究者番号 : 20313463

(2) 研究分担者

津島 晴 (TSUSHIMA AKIRA)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号 : 90171991
(H20→21 : 連携研究者)

眞銅 雅子 (SHINDO MASAKO)
横浜国立大学・工学研究院・特別研究教員
研究者番号 : 10345481
(H20→21 : 連携研究者)

(3) 連携研究者