

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244094

研究課題名(和文) 微粒子プラズマの計測と解析・制御

研究課題名(英文) Measurements, Analyses and Control of Fine-Particle Plasmas

研究代表者

林 康明 (Hayashi, Yasuaki)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：30243116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、計測を中心とした解析によりプラズマ中の微粒子の挙動を力学的に把握し、微粒子プラズマにおける物理現象を解明することを目的とした。特に、種々の新しい計測・解析技術の開発を行った。具体的には、イメージング・ミー散乱エリプソメトリ、インテグラルフォトグラフィー法、微粒子プラズマ計測のためのダブルプローブ法、高周波自己バイアス測定法や微粒子の動画解析法である。

これらの計測・解析技術を駆使して、微粒子プラズマの物理現象解析や成長・除去など実用的な微粒子制御技術の開発、および三次元等方的な場の中に微粒子を捕捉する制御方法の開発と微粒子プラズマ実験固有の装置の設計指針を得ることを目指す。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is the development of new measurement and analysis methods, the analyses of mechanics and dynamics of fine particles in plasmas using the developed methods, and the clarification of physical phenomena of fine particles plasmas. Especially, we have developed new measurement and analysis methods such as imaging Mie-scattering ellipsometry, integral-photography, double-probe method, RF self-bias measurement method, and dynamic image analyses.

Using these developed measurement and analysis methods, we are setting out the goals of the analyses of physical phenomena of fine particles, the development of control methods of fine particles for practical applications as the synthesis of nano-particles or dust removal, and the acquisition of design guide of peculiar system of fine particle plasma after the development of control method of particles suspended in a 3D isotropic field.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：Fine-Particle Plasma Plasma Fine Particles Measurement Control Dusty Plasma

### 1. 研究開始当初の背景

一般に、グロー放電プラズマ中のマイクロサイズの微粒子は数千～数万個にも帯電し、巨大な質量と電荷を持つ負イオンのように振舞う。したがって、微粒子を大量に含むプラズマは、電子、イオンと大きな負荷電粒子の三者が混在する複合プラズマとなっており、特異な性質を示す。マイクロサイズの微粒子の挙動や配列は、微粒子プラズマと共通する様々な物理現象を容易に可視化できるという特徴がある。このため微粒子プラズマは、相転移や臨界現象を構成粒子個々の挙動から観測する方法として最近注目されている。その他、様々な物理を解析する手段として、さらには新しい物理を切り開く研究対象としても大きな可能性を有している。

微粒子プラズマの研究は古くは宇宙塵の理論・観測を中心とした研究から始まった。1994年には、負帯電した微粒子がプラズマ中で結晶状に配列する“クーロン結晶”が世界の3ヵ所で独立して同時に発見されてから、固体物理とも関連した基礎科学の分野における関心が急速に高まった。ところが、地上重力下では微粒子がプラズマ下部のシース部分に沈んで特殊な構造の結晶となるため、国際宇宙ステーションなどを利用した微小重力実験が欧州で行われるようになった。しかし、微小重力下では微粒子はプラズマ内部に捕捉されるものの、微粒子が周辺部に押しやられて中央に微粒子群の空洞(ポイド)ができることがわかってきた。これはプラズマ中のイオンの流れによる粘性力あるいは電位分布が原因と考えられているが詳細は理解されておらず、その解明と制御技術開発が課題となっている。さらに、結晶化や相転移・臨界現象を構成粒子個々の挙動から観測する実験を真に目指した、三次元等方的な微粒子の場を構成する、固有の新規装置の開発が必要となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、計測を中心とした解析によりプラズマ中の微粒子の挙動を力学的に把握し、微粒子プラズマにおける物理現象を解明することを目的とする。特に、種々の新しい計測・解析技術の開発を中心に行う。これらを用いて、微粒子プラズマの物理現象解析や成長・除去など実用的な微粒子制御技術の開発、および三次元等方的な場の中に微粒子を捕捉する制御方法の開発と微粒子プラズマ実験固有の装置の設計指針を得ることを目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) イメージング・ミー散乱エリプソメトリ

本研究において開発したイメージング・ミー散乱エリプソメトリでは、エリプソメータの受光部の光検出器に代えて、イメージセンサを用いる。イメージセンサは、言わば光検出器が画素毎に備えられたデバイスであり、各

画素に対応した2次元面上の位置における微粒子のミー散乱に関する情報を得ることができる。つまり、微粒子の粒径の空間分布を求めることができる。

実験では、エリプソメータの測定に回転波長板型を用いた。光源部側は、レーザー光源(波長 532 nm)、偏光子(Glan Taylor プリズム、方位角 90°)、回転波長板(水晶製 1/4 波長板、1 回転 2 秒)より構成され、受光部は、検光子(偏光板、方位角 45°)、光学フィルター(波長 532 nm 用)、イメージセンサ(市販品ビデオカメラ内臓 CMOS 型、4M Pixel)より構成される。また、プレーナマグネトロンプラズマ装置を用い、圧力 65 Pa のアルゴンプラズマ中に、球形(準)単分散のジビニルベンゼン・ポリマー微粒子を捕捉させた。

一定の画像範囲内の平均光強度の波長板回転に伴う変化を、フリーソフト Image-J を用いて取得し、その離散フーリエ変換を通して、エリプソメータの角度パラメータを求めた。

#### (2) インテグラルフォトグラフィー

インテグラルフォトグラフィーの立体画像撮影技術では、マイクロレンズが平面状に多数個並んだレンズアレイを、被写体とイメージセンサなどの撮像体との間に設置し、撮像体に記録されたマイクロレンズ個数分の要素画像を、何らかの処理により立体像を再生する。実験では、撮像体に、市販のデジタル一眼レフカメラに内蔵されている CMOS イメージセンサ(36M Pixel)を利用した。そして、イメージセンサ内の有効画素を最大限に利用するため、被写体(微粒子)、レンズアレイ、イメージセンサの間の距離とレンズの焦点距離を最適化した。また、3次元像の再生では、デジタル画像のデータを取得し、変換式に基づいてコンピュータを用いた数値計算を行った。

微粒子プラズマの実験装置には、平行平板型の RF プラズマ装置を用いた。圧力 80Pa 窒素放電プラズマ中に、直径 6.5 μm の球形単分散のポリマー微粒子を捕捉させた。微粒子を観測するための光散乱光源には、波長 532nm、出力約 10mW、ビーム径 4mm の小型レーザーを用いた。

#### (3) ダブルプローブ計測

微粒子プラズマにおいてダブルプローブ法を用いて、イオン密度と電子温度を測定した。この方法は、高周波放電におけるプラズマ電位の時間変動への対策を講じることなく、測定ができることを利点とする。直径 60 mm の円盤電極が上下に 30 mm 隔てられて配置されている PK-3 Plus 装置において、測定が行われた。装置では、Ar ガスの圧力を 40 Pa に保ち、13.56 MHz、0.4 W の高周波電力を印加することによってプラズマを発生させた。そこへ粒径が 2.6 μm の微粒子を大量に注入した。微粒子の密度が極端に高いため、微粒子群の底部では疎密波が励起されたが、計測

には影響を与えない。この微粒子群へ一對のプロブチップを挿入すると、チップがシースで覆われ、チップからある程度距離を隔てたところに微粒子が分布した。この微粒子の分布位置が、微粒子に働く静電力とイオン粘性力とが釣り合うところである。このような状況で、チップ間に $\pm 30$  Vの電圧を印加して電流-電圧特性を取得した。

#### (4) 微粒子の3次元分布解析と制御

実験に用いた装置の真空槽は、大きさが外径5 cm、長さ10 cmのガラス管で、ガラス管軸を鉛直方向にして設置した。微粒子はガラス管の上方約50 cmから自由落下させて投入した。ガラス管の外側上下には円板状のrf電極一對が平行に取り付けてあり、下側の電極は接地した。一様磁場の実験では、銅製の接地電極の下側には直径5 cmのネオジム磁石を置いた。表面磁場は約0.3 Tである。この磁石によって、径方向にほぼ一様な磁場を観測領域に印加した。磁石は電極を最上端として上下方向に可動であり、電極からの距離を変えることで観測領域における、高さ方向の磁場を変えた。非一様磁場の実験では、内径15 cm、長さ60 cmのガラス管中に幅約15 cm、長さ約40 cmの接地金属板を置き、さらにその上に、一辺が11 cmの正方形で中心に直径10 cmの穴の開いたステンレス製電極を置いて3層構造とした。最上段の電極の穴は、内部を観察できるように金属性のメッシュで覆われている。中段の電極は微粒子の閉じ込め電極であり、最上段と最下段の電極は、ガラス板で覆われている。最上段の電極はrfのパワー電極であり、中段と最下段の電極は接地されている。最下段の電極の下に直径5.5 mmの永久磁石が置かれている。表面磁場は約0.14 Tである。

実験では、アルゴン・ガスを圧力数Pa~数十Paとした。rf電力は20 W程度以下とした。微粒子には、直径数 $\mu\text{m}$ の単分散のアクリル樹脂球を用いた。

計測は、赤色レーザーよりも視認性がより高い波長532 nmの緑色レーザー光を薄い扇状に広げて真空容器外から微粒子を照射し、その散乱光を、真空容器外に設置したカメラで静止画や動画として記録した。

#### (5) 高周波プラズマ中に作られる微粒子雲内の微粒子運動の解析

真空容器内に平行平板電極を置き、100 kHz高周波放電により、アルゴンプラズマを定常的に発生させた。下電極には、リング型の金属電極を置き、井戸型のシースポテンシャルを作った。一方、上部にはダストドロッパーを置き、直径5  $\mu\text{m}$ のシリカ微粒子を落下させた。帯電微粒子の観測のため、側面よりLED光を照射し、長焦点顕微カメラ (SELMIC HAS-L1, x100, 100 f/s)にて記録した。得られた画像は、軌道解析ソフトウェアを用いて軌道座標を読み取った。そして、軌跡解析、FFT分析、相関分析などの分析を行った。

#### (6) プラズマを利用した単層カーボンナノチューブ微粒子の成長と解析

プラズマを利用した単層カーボンナノチューブ (SWNT) の成長方法として、従来技術のアーク放電法を改良したバイポーラ・アーク放電法と、熱CVDにおいて高周波プラズマを併用した熱フィラメント-RFプラズマCVD法を開発した。

また、熱フィラメント-RFプラズマCVD装置において、SWNTが成長する過程をモニタリングする方法として、高周波プラズマの自己バイアス電圧を測定した。プラズマ中にSWNT微粒子が成長すると、微粒子表面に電子が付着し、負に帯電した微粒子はプラズマ空間中に閉じ込められ、プラズマ中の電子密度を低下させる。その結果、電極近傍よりも電極間でのプラズマを維持するための電離が主となる。その結果、自己バイアス電圧が低下する。これを利用して、SWNTが成長しプラズマ空間中に捕捉されている状態をモニタリングした。

### 4. 研究成果

#### (1) イメージング・ミー散乱エリプソメトリ

エリプソメトリでは精確に微粒子の粒径の評価が行える。今回の測定・解析により、層毎に10~20 nm程度の微粒子の粒径分布があることが分かった。こうした結果は、今回の実験で初めて明らかにされたものである。したがって、イメージング・ミー散乱エリプソメトリの微粒子プラズマ諸現象の解析についての有用性が実証された。今後は、本計測方法を、比重・粒径の異なる二種類の微粒子を混合して二相分離・共存現象の解析や、微粒子成長過程における粒径の空間分布の解析に応用する予定である。

一方、イメージング・ミー散乱エリプソメトリは、ビデオを用いて確認することにより、遠方から集光された散乱光のアラインメントにも利用できる。つまり、大型装置において光検出器を含む受光部を微粒子の存在する位置から真空槽外など距離を置いて設置しなければならない場合などに有用である。そこで、核融合科学研究所の核融合実験装置LHDのダイバータ付近のダストを観測するため、イメージング・ミー散乱エリプソメトリ装置の設置を行った。しかし、LHDでは平成28年度より重水素実験が始まって真空容器近くにイメージングデバイスを設置することができなくなり、京都工芸繊維内にダストプラズマ実験用のヘリコン波励起プラズマ装置を製作し、これを用いたダスト観測の実験を進めている。

#### (2) インテグラルフォトグラフィー

インテグラルフォトグラフィーを用いて、プラズマ中の微粒子の位置を3次的に解析する方法を開発し、観測と測定誤差の評価を行った。市販の汎用的なRaytrixカメラを利用して同様のことが実現でき、実際に、プラズマ中の微粒子の配列の解析に応用した

例もある。しかし、本研究の成果は、微粒子プラズマにおける様々な特殊条件に対応した設計と最適化を可能としたことである。今後は、本技術を微粒子プラズマにおける種々の物理現象の3次元空間での解析に応用することが期待される。

### (3) ダブルプローブ計測

予備実験にて、扱う装置における電子（イオン）密度がそれほど大きくないとの予想から、電子密度の変動に対して敏感なマイクロ波共振プローブを利用して電子密度を測定した。この測定では、マイクロ波の共振を得るためにプラズマの体積に対して比較的大きなアンテナをプローブとした。そのためプローブがプラズマに大きな影響を与え、プローブ表面におけるプラズマの消滅が無視できない状態となり、本来の電子密度よりも低い値を見積もるにとどまった。これに対し、本研究のダブルプローブ法では、イオン密度と電子温度が適切な状況で直接測定される。微粒子プラズマの状態を理解する上でその恩恵は大きい。これまで微粒子の電荷ですら、その見積もりではプラズマパラメータを仮定して軌道運動制限理論に頼るばかりであった。本研究のプラズマパラメータの測定により、実験で観測される現象とその解釈に用いられる理論や計算とのつながりをより密接にすることができた。

### (4) 微粒子の3次元分布解析と制御

磁場によって微粒子集団に回転を与えることができること、磁場の強さや向きによってその回転速度や回転方向を制御可能なことが明らかとなった。また、磁場の強さによって、一様磁場においては微粒子集団から少数の微粒子を吹き出させることが可能であること、非一様磁場では同一水平面においてシア流を形成することが可能であることなどを見出した。プラズマ中の帯電微粒子集団は、微「粒子」ではあるが、多くの場合にNavier-Stokes 方程式などの流体的描像に従うことが明らかとなった。このような流体的描像が支配的な系ではあっても微「粒子」的な固有の振舞を見いだせるものと考えており、微粒子プラズマの基礎物理をはじめ、物理学の様々な分野における知見の拡大に寄与できると期待している。

### (5) 高周波プラズマ中に作られる微粒子雲内の微粒子運動の解析

超焦点カメラを導入することにより、遠方における微粒子運動を100倍以上に拡大して、高速で記録することができた。この粒子運動は、軌道解析ソフトウェアにより数値座標として記録し、軌道解析、FFT、自己相関、相互相関などの数値処理を行った。

100 kHzの高周波プラズマを用いることにより、微粒子雲内に低周波電場揺動を起こすことができた。また、井戸型ポテンシャルを大きく作ることにより、ロッド型微粒子多数を浮遊させることにも成功した。それらは、定常スピン運動していることが分かった。

### (6) プラズマを利用した単層カーボンナノチューブ微粒子の成長と解析

通常のDCアーク放電では、原料の約50%がカソードに堆積してしまい、効率が悪い。ACアーク放電では、電極の冷却効果が影響し、炭素の昇華効率が下がる。本研究で採用した1 Hz程度のバイポーラ・アーク放電では、原料を100%近く昇華させることができるようになった。

熱フィラメント-プラズマCVDにより作製された屈曲した構造のSWNTは、SWNT微粒子の表面積を増大させ、水素貯蔵やガス吸着の用途に適している。より高い密度のプラズマ中に捕捉させれば、プラズマ中におけるSWNT微粒子の電位は増加し、イオンが加速されて微粒子に衝突することにより、ダメージの大きい、すなわち表面積の大きいSWNT微粒子が生成できることが、簡単な計算から説明された。したがって、高密度のプラズマと熱フィラメントを併用すれば、水素貯蔵用を目的としたSWNT微粒子作製技術を開発することが可能となる。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計29件)

- 1) “Design of an Open-Ended Plenoptic Camera for Three-dimensional Imaging of Dusty Plasmas”, A. Sanpei, K. Tokunaga, and Y. Hayashi, accepted for publication to Jpn. J. Appl. Phys., 査読有
- 2) “Mie-Scattering Ellipsometry System for Analysis of Dust Formation Process in Large Plasma Device”, Y. Hayashi, M. Kawano, A. Sanpei, and S. Masuzaki, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.44, pp.1032-1035 (2016), DOI: 10.1109/TPS.2016.2542349, 査読有
- 3) “Initial result of three-dimensional reconstruction of dusty plasma with integral photography technique”, A. Sanpei, N. Takao, Y. Kato, Y. Hayashi, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.44, pp.558 - 561 (2016), DOI:10.1109/TPS.2015.2498942, 査読有
- 4) “Behavior of fine particle (dust) clouds in plasmas under gravity and microgravity”, H. Totsuji, K. Takahashi and S. Adachi, Int. J. Microgravity Sci. Appl. 33(2), 330209 (2016), DOI: 10.2345/jasma.33.330209, 査読有
- 5) “Recent Progress in Study of Dusty Plasmas under Microgravity - Current Status of Researches Based on Measuring Plasma Parameters -”, K. Takahashi, J. Plasma Fusion Res. 92, pp.378-382 (2016), [http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JSPF/jspf2016\\_05/jspf2016\\_05-378.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2016_05/jspf2016_05-378.pdf), 査読有
- 6) “Effect of gelatin on the water dispersion and centrifugal purification of single-walled carbon nanotubes”, K. H. Maria and T. Mieno, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 01AE04-1-7

- (2016), DOI: 10.7567/JJAP.55.01AE04, 査読有
- 7) "Evolution of functionalized multi-walled carbon nanotubes by dendritic polymer coating and their anti-scavenging behavior during curing process", A. K. M. Moshikul Alam, M. D. H. Beg, R. M. Yunus, M. F. Mina, K. H. Maria, T. Mieno, *Materials Letters*, **367** (2016)58-60, DOI: 10.1016/j.matlet.2015.12.130, 査読有
  - 8) "Motions of dust particles in a complex plasma with an axisymmetric nonuniform magnetic field", Yoshifumi Saitou, *Phys. Plasmas*, **23**, 013709-1 – 013709-5 (2016), DOI: 10.1063/1.4940944, 査読有
  - 9) "Estimation of Plasma Parameters in Dusty Plasmas for Microgravity Experiments", Takahashi, K., Thomas, H, M, Molotkov, V, I, Morfill, G, E, Adachi, S., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **32**(4) 320409 (2015), DOI: 10.15011/jasma.32.320409, 査読有
  - 10) "Production of carbonaceous molecules by the impact reaction in nitrogen gas by use of a gas-gun", T. Mieno, K. Ookouchi, K. Kond, S. Hasegawa, K. Kurosawa, *Advanced Materials Res.* Vol. **1117** (2015) pp.31-34, DOI: 10.4028/www.scientific.net/ARM.1117.31, 査読有
  - 11) "Possibility of production of amino acids by impact reaction using a light-gas gun as a simulation of asteroid impacts", K. Okochi, T. Mieno, K. Kondo, S. Hasegawa, K. Kurosawa, *Orig Life Evol Biosph* **45** (2015) pp. 195-205, DOI: 10.1007/s11084-015-9419-4, 査読有
  - 12) "Conductive cotton textile from safely functionalized carbon nanotubes", Md. J. Rahman, T. Mieno, *J. Nanomaterials*, **2015** (2015) ID 978484-1-10, DOI: 10.1155/2015/978484, 査読有
  - 13) "Synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-frequency bipolar pulsed arc discharge method", K. H. Maria, T. Mieno, *Vacuum* **113** (2015) 11-19, DOI: 10.1016/j-vacuum.2014.11.025, 査読有
  - 14) "Specific Surface Area of Carbon Fine Particles Including Single-Walled Carbon Nanotubes Synthesized by Hot-Filament Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition", Ryuhei Yamada, Yasuhiro Masaki and Yasuaki Hayashi, *MRS Proceedings*, 1586, jsapmrs13-1586-7082 (2014), DOI: 10.1557/opl.2014.345, 査読有
  - 15) "Water-Dispersible multiwalled carbon nanotube obtained from citric-acid-assisted oxygen plasma functionalization", Md. J. Rahman, T. Mieno, *J. Nanomaterials*, **2014** (2014) 508192-1-9, DOI: 10.1155/2014/508192, 査読有
  - 16) "Effects of magnetic field and gravity on single-walled carbon nanotube production in tree directions of arc discharge current", Md. J. Rahman, T. Mieno, *JPS Conf. Proc.* **1** (2014) 015074-1-8, DOI: 10.7566/JSPSCP.1.015074, 査読有
  - 17) "Tempest in a Glass Tube - A Helical Vortex Formation in a Complex Plasma", Y. Saitou and O. Ishihara, *Journal of Plasma Physics* **80**, 869-876 (2014), DOI: 10.1017/S0022377814000518, 査読有
  - 18) "Differential dust disk rotation in a complex plasma with magnetic field", Y. Saitou, A. A. Samarian, and O. Ishihara, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference, JPS Conference Proceedings* **1**, 015012-1~4 (2014), DOI: 10.7566/JSPCP.1.015012, 査読有
  - 19) "Synthesis of Single-Walled Carbon Nanotubes in Dusty Glow-Discharge Plasma", Yasuaki Hayashi, Yasuhiro Masaki and Ryuhei Yamada, *Ukraine J. Phys.* Vol. **59**(4), 411 (2014), [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ukjourph\\_2014\\_59\\_4\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ukjourph_2014_59_4_13), 査読有
  - 20) "Production of Single-Walled Carbon Nanotubes by Modified Arc Discharge Method", M. J. Rahman, T. Mieno, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** (2013) 056201-1-5, DOI: 10.7567/JJAP.52.056201, 査読有
  - 21) "Dynamic Circulation in a Complex Plasma", Kazufumi Saitou and Osamu Ishihara, *Phys. Rev. Lett.* Vol.111(18), 185003 (2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.185003, 査読有
- 〔学会発表〕(計65件)  
 (内招待講演計12件/国際会議計17件)
- 1) "Analysis of Spatial Distribution of Fine Particles in Plasma by Imaging Mie-Scattering Ellipsometry", Y. Hayashi, A. Sanpei, T. Mieno, and S. Masuzaki, 8<sup>th</sup> Int. Conf. Phys. Dusty Plasmas (ICPDP), May 20-25, 2017, Prague, Czech
  - 2) "Levitation of Microorganisms in the Sheath of an RF Plasma", A. Sanpei, T. Kigami, H. Kanaya, Y. Hayashi, and M. Sanpei, 8<sup>th</sup> ICPDP, May 20-25, 2017, Prague
  - 3) "Measurement of Ion Density and Electron Temperature around Voids in Dusty Plasmas", K. Takahashi, et. al., 8<sup>th</sup> ICPDP, May 20-25, 2017, Prague
  - 4) "Motion of Dust Particles in Nonuniform Magnetic Field and Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation", Y. Saitou, 8<sup>th</sup> ICPDP, May 20-25, 2017, Prague, [Invited]

〔図書〕(計 4件)

- 1) "Mie-Scattering Ellipsometry" in "ELLIPSOMETRY", Y. Hayashi and A. Sanpei: INTECH, 2017, 20 pages
- 2) 「プラズマプロセス技術」林康明(責任編著), 三重野哲, 高橋和生, 他14名著, プラズマ・核融合学会編, 森北出版, 2016, 全273ページ
- 3) "PLASMA SCIENCE AND TECHNOLOGY - PROGRESS IN PHYSICAL STATES & CHEMICAL REACTIONS -", ed. T. Mieno, INTECH, 2016, 574 pages
- 4) "Safer Production of Water Dispersion Carbon Nanotubes and Nanotube/Cotton Composites Material" in "Carbon Nanotubes-Current Progress of their Polymer Composites", Md. J. Rahman, T. Mieno: INTECH, 2016, pp.1-25

〔その他〕

・国際シンポジウム開催: Int. Symp. Plasma Sci. Technol., August 26, 2016, Kyoto

・プロジェクトセンター「プラズマ制御科学研究センター」の設置および公開研究会開催 (<http://fpp.es.kit.ac.jp/>参照):

- 1) 2013年度第1回, 2013.10.5
- 2) 2013年度第2回, 2014.3.15-3.16
- 3) 2014年度第1回, 2014.10.18
- 4) 公開セミナー, 2014.12.20
- 5) 2014年度第2回, 2015.3.27-3.28
- 6) 2015年度第1回, 2015.9.3-9.4
- 7) 2015年度第2回, 2016.3.28-3.29
- 8) 2016年度, 2017.3.22

6. 研究組織

(1)研究代表者

林 康明 (HAYASHI YASUAKI)  
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授  
研究者番号: 30243116

(2)研究分担者

高橋 和生 (TAKAHASHI KAZUO)  
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授  
研究者番号: 50335189

三重野 哲 (MIENO TETSU)  
静岡大学・理学部・教授  
研究者番号: 50173993

齋藤 和史 (SAITOU YOSHIFUMI)  
宇都宮大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 70251080

(3)連携研究者

石原 修 (ISHIHARA OSAMU)  
中部大学・学長  
研究者番号: 20313463

東辻 浩夫 (TOTSUJI HIROO)  
岡山大学・名誉教授  
研究者番号: 40011671

増崎 貴 (MASUZAKI SUGURU)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号: 80280593

足立 聡 (ADACHI SATOSHI)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授  
研究者番号: 80358746

(4)研究協力者

三瓶 明希夫 (SANPEI AKIO)  
京都工芸繊維大学・講師  
政宗 貞男 (MASAMUNE SADAO)  
京都工芸繊維大学・教授  
比村 治彦 (HIMURA HARUHIKO)  
京都工芸繊維大学・准教授  
黒江 康明 (KUROE YASUAKI)  
京都工芸繊維大学・名誉教授  
藤原 進 (FUJIWARA SUSUMU)  
京都工芸繊維大学・教授  
宮田 貴章 (MIYATA QUI TRAN-CONG)  
京都工芸繊維大学・教授

庄司 多津男 (SHOJI TATSUO)  
名古屋大学・招聘教員  
佐藤 徳芳 (SATO NORIYOSHI)  
東北大学・名誉教授

渡辺 征夫 (WATANABE YUKIO)  
九州大学・名誉教授

上村 鉄雄 (KAMIMURA TETSUO)  
核融合科学研究所・名誉教授

柴田 裕実 (SHIBATA HIROMI)  
大阪大学・特任研究員  
白谷 正治 (SHIRATANI MASA HARU)  
九州大学・教授  
浜口 智志 (HAMAGUCHI SATOSHI)  
大阪大学・教授

Prof. Laifa Boufendi  
University of Orleans, France  
Assoc. Prof. Uwe Konopka  
Auburn University, U. S. A.  
Prof. Edward Thomas, Jr.  
Auburn University, U. S. A.

Prof. Oleg F. Petrov  
Russian Academy of Sciences, Russia  
Dr. Hubertus M. Thomas  
DLR, Germany

Prof. Gregor E. Morfill  
Terraplasma GmbH, Germany

Prof. V. E. Fortov  
Russian Academy of Sciences, Russia