

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760106

研究課題名 (和文) 誘起的乱流逆利用によるプラズマ流ナノ粒子創製プロセス用
新規制御デバイスの開発研究課題名 (英文) Development of novel control devices for plasma synthesis
of nanoparticles using turbulence excitation

研究代表者

茂田 正哉 (SHIGETA MASAYA)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30431521

研究成果の概要 (和文)：本研究課題の目的は、プラズマ流の乱流変動場の制御を通じて目的に応じたナノ粒子を創製するためのデバイスを構築することである。そのために新規数理モデルを独自に考案しプラズマ流動場とナノ粒子群生成・成長過程の関係性を明らかにすると共に、複雑熱流動場場に対する SPH 法の適用性を拡張、さらには実験的に乱流不安定性、渦構造と音波発生との関係を調べ、それらの制御を行ったことでシステム構築のための知見を得た。

研究成果の概要 (英文)：The objective of this study is to develop the device that produces desired nanoparticles by controlling the turbulent fluctuation field in a plasma flow. The interaction between the plasma flow field and the generation/growth process of nanoparticles is clarified by the unique mathematical model. The SPH method is also developed to simulate complicated thermofluid fields. Furthermore, the turbulent instability and the relation between the vortex structure and the sound generation are investigated and controlled experimentally.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学・プラズマ工学・ナノ粒子

1. 研究開始当初の背景

ナノスケールの超微粒子は剛性や延性、電子的・光学的・触媒化学的諸特性などの物質機能が顕著となるため、自動車の排ガス浄化触媒、ドラッグデリバリーや磁性ナノ粒子の抗体付着による病原菌検出、DNA プローブ結合による遺伝子検出の超高感度化といった応用が試みられている。そのため目的に応じた粒径や機能性が制御されたナノ粒子の創製が求められており、特にプラズマ流を用いることで他の手法をはるかに凌ぐ大量生産

が可能であると考えられている。しかしながら、依然として粒径の制御は困難であり、それどころかプラズマ流近傍におけるナノ粒子の形成機構自体が未解明であるため、望むべき物質機能の制御にも到底至っていない。

2. 研究の目的

本研究課題の最終的な目的は、プラズマ流の乱流変動場の制御を通じて目的に応じたプロセスコントロールを実現するための学際的知識を結集したナノ粒子創製システム

を構築することである。そのために、まずプラズマ流の端部において大量のナノ粒子が一斉に集団的に急生成するという知見の上に立ち、理論的および数値的なアプローチにより、機能性ナノ粒子群の成長過程の詳細な数理モデルを構築し、プラズマ流の乱流不安定性との相関関係の解明を試みる。また実験的研究として新たに乱流場を誘起するための不安定波コントロールデバイスの考案・設計・製作を行う。

3. 研究の方法

本研究課題は理論的・数値的研究および実験的研究の両面から遂行される。

理論的・数値的研究においては、まず電磁流体力学に基づき2次元軸対称プラズマ流の数値計算を行い、さらにプラズマ流における原料粒子の蒸発過程も詳細に解析する。得られたデータをナノ粒子生成過程計算のバックグラウンドおよび入力条件として用い、プラズマ流の複雑熱流動場とナノ粒子群の集団的成長過程の関係を調べる。さらに、二成分系の機能性ナノ粒子群が気相合成される物理過程の数理モデルおよび新規計算アルゴリズムを構築し、その集団的成長過程および粒径一組成分布の定量的な数値予測を試みる。また、プラズマ材料プロセスに内包される熱・物質移動、混相現象、移動境界を含む相変化といった複雑流動現象を基礎的なレベルから効率的にシミュレートするために、粒子法の一つであるSPH法の改良も行う。

実験的研究においては、乱流遷移過程における不安定波動に対するフィードフォワード制御を試み、さらにキャビティからの流体騒音発生時のせん断層に形成される渦構造と音波発生の関係を調べると共に、流体自励振動素子（フルイディックオシレーター）等を用いた渦度制御による騒音抑制も行う。

4. 研究成果

理論的・数値的研究により、まずプラズマ流端部における単成分（金属）ナノ粒子群生成・成長過程を明らかにすることに成功した。図1は、プラズマ流端部を対向流により急冷することでナノ粒子生成を促進した場合に形成される2 nmの白金ナノ粒子群のリアクタ内空間分布である。

さらに二成分系機能性ナノ粒子群の集団的成長過程および粒径一組成分布を定量的に数値予測するための数理モデルと計算アルゴリズムを考案した。これにより世界で初めて、工学的応用範囲が非常に広い金属-シリコン系、鉄-コバルト系、鉄-白金系などのナノ粒子群の集団的成長メカニズムを解明することに成功した（図2）。

また、プラズマ材料プロセスに内包される

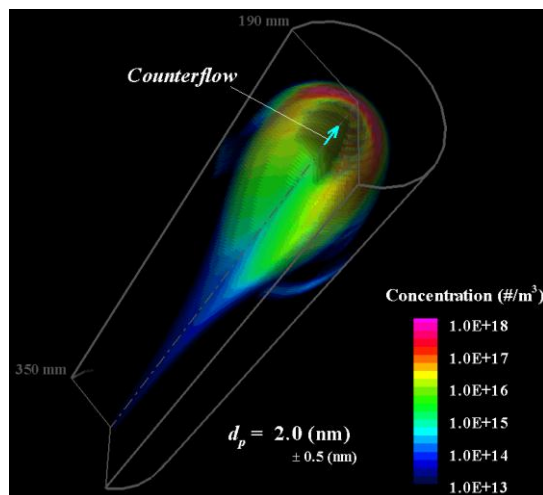


図1 2 nm白金ナノ粒子群の対向流リアクタ内分布

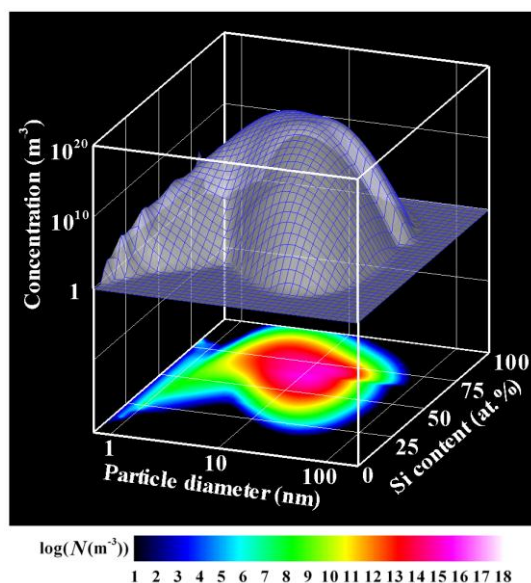


図2 Mo-Siナノ粒子群の粒径一組成分布

熱・物質移動、混相現象、移動境界を含む相変化といった複雑流動現象を基礎的なレベルから効率的にシミュレートするために、SPH法の適用範囲の拡張に努め、プラズマ流によって形成される溶融池の複雑熱流動計算にも成功した（図3）。

一方、実験的研究においては、乱流遷移過程において斜めに進行しながら成長する不安定波動をピエゾセラミックアクチュエータによるフィードフォワード制御によって、抑制することにも成功した（図4）。同時に、アクチュエータ近傍の流れ場およびストリーク構造の不安定性に関する詳細な計測も行った。

さらに、キャビティからの流体騒音発生時のせん断層に形成される渦構造と音波発生の関係についても、プローブ計測とPIV法による可視化計測に加え、3次元数値計算も組み合わせることで詳細な解析に成功した。流体騒音制御時の渦構造を含む複雑流動場と

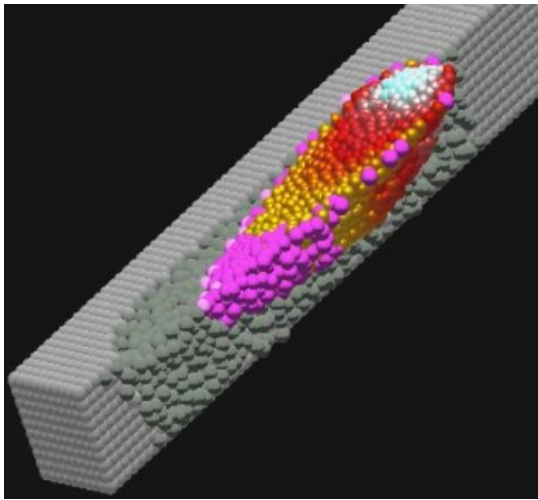


図3 SPH法による溶融池の熱流動計算

音波の関係を明らかにするのみならず、動的ボルテックスジェネレーターやフルイディックオシレーターによる渦度制御によって騒音抑制にも成功した(図3)。

以上により、プラズマ流動場、ナノ粒子群生成・成長過程、複雑熱流動場場場に対するSPH法の適用可能性、乱流不安定性、渦構造と音波発生との関係といったプラズマ流の乱流変動場の制御を通じたナノ粒子創製プロセスコントロールシステムを構築するための個々の知見が得られつつあるため、今後それらの融合を図っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

1. 佐藤祐子, 岡崎博成, 所田達也, 西尾 悠, 茂田正哉, 伊澤精一郎: 直線翼垂直軸風車周りの流れの熱線計測と数値解析, 日本機械学会論文集B編, 査読有, 77-775 巻, 2011年, 637-646
2. Masaya Shigeta, Takayuki Watanabe: Growth model of binary alloy nanopowders for thermal plasma synthesis, Journal of Applied Physics, 査読有, 108-4 巻, 2010年, 043306 (15 pages)
3. Masaya Shigeta, Takayuki Watanabe: Two-Directional Nodal Model for Co-Condensation Growth of Multi-Component Nanoparticles in Thermal Plasma Processing, Journal of Thermal Spray Technology, 査読有, 18-5-6 巻, 2009年, 1022-1037
4. 茂田正哉, 渡辺隆行: RF 熱プラズマ流による金属ナノ粒子創製プロセスの統合モデル(対向流冷却による生成促進場への適用), 日本機械学会論文集B編, 査読有, 75-758 巻, 2009年, 2019-2028

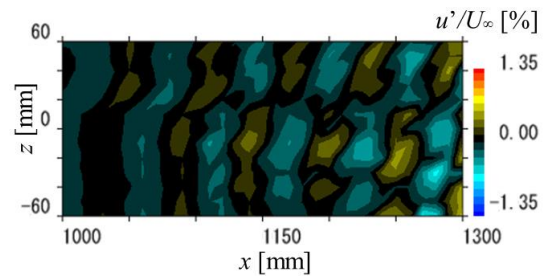


図4 不安定波の制御結果

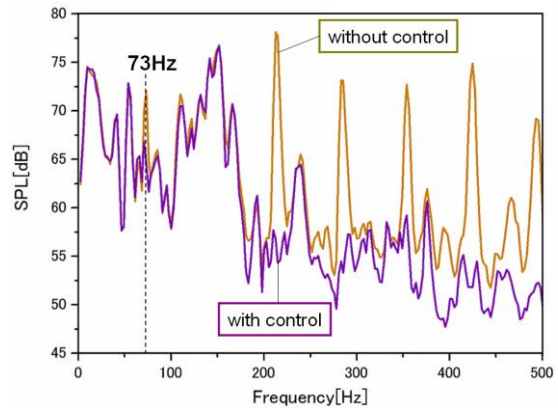


図5 流体騒音抑制効果

5. Masaya Shigeta, Takahiro Watanabe, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi: Incompressible SPH Simulation of Double-Diffusive Convection Phenomena, International Journal of Emerging Multidisciplinary Fluid Sciences, 査読有, 1-1 巻, 2009年, 1-18
6. Masaya Shigeta, Toshimasa Miura, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi: Active Control of Cavity Noise by Fluidic Oscillators, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, 57 巻, 2008年, 127-134
7. Shuta NORO, Kenji KOKUNAI, Masaya SHIGETA, Seiichiro IZAWA, Yu FUKUNISHI: Mixing Enhancement and Interface Characteristics in a Small-Scale Channel, Journal of Fluid Science and Technology, Special Issue on Micro Nano Fluids, 査読有, 3-8 巻, 2008年, 1020-1030
8. Masaya Shigeta, Takayuki Watanabe: Two-dimensional analysis of nanoparticle formation in induction thermal plasmas with counterflow cooling, Thin Solid Films, 査読有, 516 巻, 2008年, 4415-4422
9. Masaya Shigeta, Takayuki Watanabe: Numerical investigation of cooling effect on platinum nanoparticle formation in inductively coupled thermal plasmas, Journal of Applied Physics, 査読有, 103-7 巻, 2008年, 074903 (15 pages)
10. 渡辺隆行, 茂田正哉: 熱プラズマプロセスによるナノ粒子合成, 応用物理(応用

物理学会編), 査読有, 77-9 巻, 2008 年, 1098-1102

[学会発表] (計 30 件)

1. Hajime Okawa, Michiharu Watanabe, M. Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Active Feedforward Cancellation of Instability Waves, 13th Asian Congress of Fluid Mechanics, 2010 年 12 月 17 日, Dhaka, Bangladesh
2. S. Noro, M. Kaneko, M. Shigeta, S. Izawa and Y. Fukunishi: Boundary Layer Receptivity to the External Disturbances, 13th Asian Congress of Fluid Mechanics, 2010 年 12 月 17 日, Dhaka, Bangladesh
3. Masaya Shigeta: Mathematical modelling of thermal plasma synthesis of nanoparticles, Second International Symposium on Plasma Nanoscience (iPlasmaNano-II), 2010 年 12 月 13 日, Murrararang, Australia 招待講演
4. Masaya Shigeta, Masumi Ito, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Three-dimensional simulation of a flow in an arc weld pool by SPH method, The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, 2010 年 11 月 11 日, Osaka, Japan, Best Paper Award 受賞
5. Masaya Shigeta and Takayuki Watanabe: Numerical investigation of binary alloy nanopowder growth in thermal plasma synthesis, The Seventh International Conference on Flow Dynamics, 2010 年 11 月 1 日, Sendai, Japan, 招待講演
6. Yu Nishio, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Leading Edge Receptivity to Periodic Disturbances Generated by Oscillating Wings, The Seventh International Conference on Flow Dynamics, 2010 年 11 月 1 日, Sendai, Japan
7. Hajime Okawa, Shigenori Kondo, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Characteristics of Velocity Fluctuations in a Boundary Layer Excited by a Piezo Actuator Driven with Two Different Signals, The Seventh International Conference on Flow Dynamics, 2010 年 11 月 1 日, Sendai, Japan
8. Shuta Noro, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Numerical Study of Boundary Layer Receptivity to Outer Disturbances, The Seventh International Conference on Flow Dynamics, 2010 年 11 月 1 日, Sendai, Japan
9. Hiromasa Oe, Shota Teramoto, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Passive Control of Oscillating and Separating Flow, The Seventh International Conference on Flow Dynamics, 2010 年 11 月 1 日, Sendai, Japan
10. Masaya Shigeta: Numerical investigation of binary alloy nanopowder growth in thermal plasma synthesis, 2010 Workshop for Preparation of Nanoparticles by Thermal Plasma, 2010 年 10 月 27 日, Incheon, Korea, 招待講演
11. 茂田正哉: 数値モデリングによるナノ粒子群生成機構解明の試み, プラズマ材料科学 153 委員会 第 97 回研究会 (主催: 日本学術振興会 プラズマ材料科学 153 委員会), 2010 年 7 月 23 日, 東京, 招待講演
12. Hajime Okawa, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Relation between Waveforms of Piezo-Actuator Driving Signals and Excited Velocity Fluctuations inside a Flat-Plate Boundary Layer, The 5th Tohoku University - Seoul National University Joint Workshop on Next Generation Aero Vehicle, 2010 年 6 月 17 日, Sendai, Japan
13. Yu Nishio, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Leading Edge Receptivity to Oncoming Vortices, The 5th Tohoku University - Seoul National University Joint Workshop on Next Generation Aero Vehicle, 2010 年 6 月 17 日, Sendai, Japan
14. Masaya Shigeta: Growth model of binary-alloy nanopowders in thermal plasma processing, Workshop on Industrial Applications of Thermal Plasmas, 2010 年 4 月 13 日, Bologna, Italy, 招待講演
15. Masaya Shigeta: Model Formulation and Numerical Investigation of Thermal-Plasma-Aided Nanopowder Production, General Lecture of Institute of Advanced Study, University of Bologna, 2010 年 3 月 3 日, Bologna, Italy, 招待講演
16. Masaya Shigeta: Model Formulation of Nanoparticle Growth in Thermal Plasma Processing, The Eighteenth Nisshin Engineering Particle Technology International Seminar (NEPTIS-18) on Nanoparticle Synthesis in Gas Phase and Its Application - Fundamentals and applications of nanoparticles synthesized by plasma, flame, laser -, 2009 年 12 月 6 日, Hakone, Japan, 招待講演
17. S. Noro, M. Shigeta, S. Izawa, Y. Fukunishi: Numerical Study on Growth and Decay of Disturbance in a Flat-plate Boundary Layer, Sixth International Conference on Flow Dynamics, 2009 年 11 月 4 日, Sendai, Japan
18. H. Okawa, M. Watanabe, M. Shigeta, S. Izawa, Y. Fukunishi: Cancellation of

- Instability Waves in a Flat-Plate Boundary Layer by Feedforward Control, Sixth International Conference on Flow Dynamics, 2009年11月4日, Sendai, Japan
19. S. Noro, M. Shigeta, S. Izawa, Y. Fukunishi: Numerical Study on Growth and Decay of Turbulence in a Flat-plate Boundary Layer, The 4th SNU-Tohoku University Joint Workshop, 2009年9月28日, Seoul, Korea
 20. M. Shigeta, T. Watanabe: Two-directional nodal model for silicide nanoparticle growth in thermal plasma processing, 19th International Symposium on Plasma Chemistry, 2009年7月27日, Bochum, Germany
 21. 茂田正哉, 渡辺隆行: 熱プラズマによるシリサイドナノ粒子合成過程解析のための新規モデル, 第22回プラズマ材料科学シンポジウム, 2009年6月15日, 東京
 22. 茂田正哉: RF 熱プラズマ流によるシリサイドナノ粒子創製プロセスのモデリング, 第13回シリサイド系半導体研究会 (主催: シリサイド系半導体と関連物質研究会(応用物理学会)), 2009年4月3日, 東京, 招待講演
 23. 茂田正哉: 熱プラズマによるナノ粒子生成機構モデルの構築, プラズマ科学シンポジウム 2009/第26回プラズマプロセス研究会 (主催: 日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会, 応用物理学会, プラズマ・核融合学会), 2009年2月3日, 名古屋, 招待講演
 24. S. Noro, M. Shigeta, S. Izawa and Y. Fukunishi: Relation between Interface Characteristics and Mixing Effect in a Small-scale Channel Flow, Proceedings of Fifth International Conference on Flow Dynamics, 2008年11月17日, Sendai, Japan
 25. S. Teramoto, M. Shigeta, S. Izawa, Y. Fukunishi and T. Kawamura: Numerical Simulation of the Behavior of the Vortex Generated between a Pair of Rotating Cylinders, 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008年10月13日, Sapporo, Japan
 26. M. Watanabe, M. Shigeta, S. Izawa and Y. Fukunishi: Active Control of Instability Waves in a Transitional Boundary Layer Using an Array of Piezo Ceramic Actuators, 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008年10月13日, Sapporo, Japan
 27. Seiichiro Izawa, Toshimasa Miura, Masaya Shigeta, Yu Fukunishi: SUPPRESSION OF CAVITY NOISE BY FLUIDIC OSCILLATORS, 2nd International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2008年9月19日, Berlin, Germany
 28. Yu Fukunishi, Masaya Shigeta, Seiichiro Izawa: SUPPRESSION OF CAVITY NOISE BY CONTROLLING THE SPANWISE PHASE OF THE SEPARATING FLOW, 2nd International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2008年9月19日, Berlin, Germany, 招待講演
 29. M. Shigeta, T. Ohno, S. Izawa, Y. Fukunishi: THE EFFECT OF OUTER DISTURBANCE ON TRANSITION OF A FLAT-PLATE BOUNDARY LAYER, 12th Asian Congress of Fluid Mechanics, 2008年8月17日, Daejeon, Korea
 30. S. Noro, M. Shigeta, S. Izawa, Y. Fukunishi: MIXING AND INTERFACE GEOMETRY IN A SMALL-SCALE CHANNEL, 12th Asian Congress of Fluid Mechanics, 2008年8月17日, Daejeon, Korea
- [図書] (計1件)
1. Takayuki Watanabe, Masaya Shigeta, Nova Science Publishers 社 (New York, USA), 「Nanomaterials: Properties, Preparation and Processes」, 2010, 116-176
6. 研究組織
- (1)研究代表者
茂田 正哉 (SHIGETA MASAYA)
東北大学・大学院工学研究科・助教
- 研究者番号 : 30431521
- (2)研究分担者 ()
- 研究者番号 :
- (3)連携研究者 ()
- 研究者番号 :