

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244110

研究課題名(和文) コンプレックスプラズマ中の帯電微粒子とプラズマの相互作用がもたらす物理現象

研究課題名(英文) Novel features by the interaction of dust particles in a complex plasma

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円、(間接経費) 10,290,000円

研究成果の概要(和文)：ミクロンの大きさの微粒子とプラズマの相互作用によりもたらされる新たな物理現象に焦点をあてた。プラズマが全体として電気的に中性であることから、負に帯電した微粒子はプラズマ中に閉じ込められ、プラズマは複合系としてふるまう。微粒子はレーザーを当てることにより、可視化が実現する。微粒子が作る構造形成を観測し、さまざまな新しい現象を報告した：極低温コンプレックスプラズマ中での低次元構造形成、シース中に形成される2次元微粒子構造とその極低周波を特徴とする集団運動。微粒子が作るバウショックや渦現象。一方、2重らせん構造は分子生物学との関連で、コンプレックスプラズマが新たな知見を与えることを示した。

研究成果の概要(英文)：Dust particles of micron size are negatively charged in a plasma and are confined in a plasma to remain charge neutral as a system. Dust particles can be suspended in a plasma by the balance of sheath electric force and gravity, and are visible through the scattering of laser light applied from the outside of the chamber. Novel structures of dust particles are observed, including the low-dimensional structures in a cryogenic plasma, two-dimensional structures formed in a horizontal plane of the sheath, and collective oscillations with extremely low frequency. The bow shock pattern is realized by dust particles, which helps to understand the basic structures of planetary bow shock. The vortex and mass ejection are observed in the application of strong magnetic field. On the other hand, the double helical structure found in a simulation gives a platform to understand the helix commonly observed in DNA. In conclusion, our research on complex plasma opened a new field in a plasma physics.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学, プラズマ科学

キーワード：コンプレックスプラズマ ダスト プラズマ 微粒子 集団運動 相互作用 構造形成 渦

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子が作る構造についてはJ. J. Thomsonの原子模型(1904)以来, 研究が続けられてきた。相互作用する荷電粒子の構造形成としては, Madelung のイオン結合(1918), Wignerの金属中電子結晶(1934), 液体ヘリウム表面の2次元電子系(1979), 量子ドットによる人口原子(1980年代)などがある。荷電粒子の集合体であるプラズマは, 様々な要因により不安定になりやすく, またプラズマ中では電子とイオンの再結合も起こるため, プラズマを外から加える電場や磁場によって閉じ込めておくことは困難であった。そこで1960年代後半から一成分荷電粒子からなる非中性プラズマでは, PaulやDehmelt(1989 ノーベル賞)の提唱した電磁場による閉じ込めを使って, 電子やイオンが作る構造の研究がおこなわれていた。1990年代になって, ミクロンサイズの微粒子がプラズマ中に混入すると, プラズマ自身が閉じ込めの役割を果たして, 微粒子がクーロン結晶を作ることが見出された。微粒子は外場の存在を必要とせずプラズマ中に閉じ込められ, 結晶構造を作ったのである。プラズマ中の微粒子は目で見えるために, 構造そのものが可視化されるというこれまでにない実験環境を作り出した。1994年のクーロン結晶の発見以来, 微粒子の結晶構造は相転移をはじめとする基礎物理の解明に役立つことが分かり, dusty plasma, complex plasma関連の論文数は年々増え, 10年間で3000件を超え, 2005年以降は年間500件を超えるようになっている(ISI Web of Knowledge)。プラズマという弱結合系の中であって, 微粒子は強結合系としてふるまい, 複合的な性質は新規な集団運動をもたらすことが分かり2000年になってコンプレックスプラズマという領域が確立されてくる。1996年に申請者と共同研究者が提案したウェイクポテンシャルはプラズマの集団運動を介して微粒子が相互作用する場を与えるものであった(Ishihara

et al., Phys. Plasmas **3**, 444(1996); **4**, 69 (1997); **5**, 357 (1998); **6**, 737 (1999), Phys. Rev. E **57**, 3392 (1998); E **58**, 3733(1998); E **61**, 7246 (2000), Physica Scr. **T75**, 79 (1998); **57**, 293 (1998); **60**, 370 (1999))。その後申請者は微粒子の構造形成, 微粒子の関与するプラズマ不安定性などの論文を発表してきた。こうした中で, 2008年にポルトガルで第5回ダストプラズマ国際会議ICDPDP, 2010年には日本で第11回微粒子プラズマ研究会WFPPが開催されている。申請者は横浜国大, 東北大, 九州大のグループとともに, 2001年に微粒子プラズマ研究グループを結成し, 日本物理学会での招待講演『微粒子プラズマの提起する物理の問題』(2001年秋季大会)はじめ, ダストプラズマの紹介記事や特集記事を企画執筆(Butsuri **57**, 476 (2002), Parity **20**, 7 (2005), J. Plasma Fusion Res. **78**, 293 (2002); **82**, 75(2006); **85**, 509 (2009); **85**, 511 (2009); **86**, 79 (2010)), さらに国際的に多数の招待講演並びに解説記事〔J. Physics D: Appl. Phys. **40**, R121-R147 (2007) 等〕を著している。一方, コンプレックスプラズマの研究は星形成におけるダスト(0.1 μm 程度の大きさの固体微粒子)の研究として続けられていた。1980年代米国の深宇宙探査機ボイジャーが太陽系惑星のデータをもたらし, 90年代ハッブル宇宙望遠鏡がさまざまな天体の映像を送ってきて, さらに2006年に打ち上げられた赤外線天文衛星あかりは銀河からのダスト放射の遠赤外線をとらえている。ダストがいろいろな銀河の多様なプラズマ環境に存在することが明らかになりDust astronomy が誕生している(E. Grun et al., Icarus **174**, 1 (2005), Kaneda et al., Ap. J, **698**, L125 (2009))。また, 高温プラズマの存在する楕円銀河では, 巨大分子状のダストが高温ガスにより破壊されていることや, 銀河から吹き出すガス流に乗ってダストが運搬される様子も観測されている。さらに宇宙の加

速膨張について、ダークエネルギーの存在を決定付けるのにダストの役割が注意深く論じられている (A. G. Riess et al., Ap. J. **607**, 665 (2004))。こうして宇宙におけるダストの研究と実験室でのコンプレックスプラズマの研究が接点を持つようとしている。

2. 研究の目的

プラズマ中のミクロンサイズの微粒子は負に帯電し、クーロン相互作用して反発しあいながらもプラズマ中に閉じ込められ結晶構造を構成する。微粒子同士がプラズマを介して集団運動し、その複合系としての性質からコンプレックスプラズマと呼ばれている。これまで宇宙塵、微粒子強結合系の研究、産業プラズマプロセスにおける反応性プラズマのダスト生成、無重力下宇宙ステーションでのプラズマ微粒子実験などが行われ、2000 年以降新たな科学領域をきりひらきつつある。

特にレーザー照射により微粒子が可視化できるため運動論的なレベルで観察できることが魅力となっている。我々は室温から液体ヘリウム温度までの環境で、コンプレックスプラズマの基礎物理の確立のため、プラズマと微粒子の相互作用が関与する相転移、強結合系、3次元クーロン結晶、低次元構造形成、高密度、超音速流、超臨界等の現象を理論・実験・シミュレーションから研究する。

3. 研究の方法

微粒子(0.1~10 μ m, 誘電体/導体)を含んだ放電プラズマを作り、極低温(液体ヘリウム温度下でのプラズマ生成)、高密度(強結合を達成する微粒子クラスター)、超音速流(ダスト音波を超える微粒子流)、超臨界(微粒子がつくる固液気相変化の臨界状態)といった極限状態での物理現象を明らかにしていく。2004年に実験室を立ち上げてから、設備の整備と基礎実験によりこうした極限物理に取り組む基盤が出来上がったと考えている。大面積コンプレックスプラズマ装置YCOPEXは、

重力を有効に利用して、放電管内に微粒子供給源をいれた装置で、密度制御、相変化観察、微粒子流発生が簡単にできる。一方低温冷却コンプレックスプラズマ装置YD-1,2,3は極低温環境下での帯電微粒子とプラズマの相互作用を観測できるように工夫が凝らされている。また、分子運動論に基づくコンプレックスプラズマシミュレータを使って、実験現象を再現していく。実験の担い手は大学院生に依存するが、国内、国外との共同研究を通して計画を遂行する。

4. 研究成果

ミクロンの大きさの微粒子とプラズマの相互作用によりもたらされる新たな物理現象に焦点が当てられた。プラズマが全体として電氣的に中性であるようにすることから、負に帯電した微粒子はプラズマ中に閉じ込められ、プラズマは複合系としてふるまう。微粒子はレーザーを当てることにより、可視化が実現する。微粒子が作る構造形成を観測し、さまざまな新しい現象を報告した：極低温コンプレックスプラズマ中での低次元構造形成、シース中に形成される2次元微粒子構造とその極低周波を特徴とする集団運動。微粒子が作るバウショックや渦現象。一方、2重らせん構造は分子生物学との関連で、基礎的な知見を与えようことを示した。

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 11 件)

1. Y. Saitou, A. A. Samarian, and O. Ishihara, Differential dust disk rotation in a complex plasma with magnetic field, Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference, JPS (Physical Society of Japan) Conference Proceedings **1**, 015012-1~4 (2014). 10.7566/JPSCP.1.015012 (査読有り)
2. M. Shindo, A. Samarian, and O. Ishihara, Dynamics of Charged Dust near Liquid Helium Surface, Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference, JPS (Physical Society of Japan) Conference Proceedings 015049-1~4 (2014). 10.7566/JPSCP.1.015049 (査読有り)
3. F. Sayed, S. V. Vladimirov, Yu. Tyshetskiy, and O. Ishihara, Modulational interactions in quantum plasmas, Physics of Plasma **20**,

- 072116-1~11 (2013). DOI 10.1063/1.4816705 (査読有り)
4. Y. Saitou and O. Ishihara, Dynamic Circulation in Complex Plasma, *Physical Review Letters* **111**, 185003-1~5 (2013). DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.185003> (査読有り)
 5. B. P. Pandey, S. V. Vladimirov and O. Ishihara, Surface waves in the magnetized, collisional dusty plasmas, *Physics of Plasmas* **20**, 103703-1~5 (2013). DOI 10.1063/1.4826979 (査読有り)
 6. Y. Saitou, Y. Nakamura, T. Kamimura, and O. Ishihara, Bow shock formation in a complex plasma, *Physical Review Letters* **108**, 065004 (1-4) (2012). (査読有り)
 7. Tetsuo Kamimura and Osamu Ishihara, Coulomb Double Helical Structure, *Physical Review E* **85**, 016406(1-7) (2012). (査読有り)
 8. O. Ishihara, Low-dimensional structures in a complex cryogenic plasma, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **54**, 124020-1~7(2012). (査読有り)
 9. M. Chikasue, M. Shindo and O. Ishihara, Thermophoretic Force on a Dust Particle in a Diffused Plasma in the Vapor of Liquid Helium, in *Dusty/Complex Plasmas: Basic and Interdisciplinary Research*. AIP Conf. Proc. **1397**, 337 (2011). (Melville, New York, American Institute of Physics, 2011) (査読有り)
 10. 上村鉄雄, 石原修, 須賀裕太, 'Stable Helical Structure of Coulomb Cluster,' *Research Reports of the Faculty of Science and Technology, Meijo University, Nagoya Japan* **51**, 19 (2011). (査読なし)
 11. 上村鉄雄, 石原修, 瀬戸章, 米澤逸人, 齋藤和史, 中村良治, 'Formation of bow shock in dust flow in a plasma,' *Research Reports of the Faculty of Science and Technology, Meijo University, Nagoya Japan* **51**, 29 (2011). (査読なし)
- [学会発表](計 32 件)
1. O. Ishihara, Dynamics of Charged Dust Particles in a Complex Plasma, The 8th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-8) National Chiao Tung University (NCTU), Hsinchu, Taiwan (December 20-22, 2013). Invited talk
 2. Y. Saitou, A. Samarian and O. Ishihara, Vortex Formation in a Complex Plasma, 14th Workshop on fine particle plasmas (National Institute of Fusion Science, Toki, Japan, Dec. 12-13, 2013).
 3. M. Shindo, T. Wakiya, S. Pineda, A. Samarian and O. Ishihara, Charged Complex under the Liquid Helium Surface, (National Institute of Fusion Science, Toki, Japan, Dec. 12-13, 2013).
 4. 齋藤和史, 石原修, 磁場中コンプレックスプラズマにおける厚みのある円盤の回転運動 (日本物理学会 2013 年秋季大会, 平成 25 年 9 月 25 日- 28 日, 徳島大学) 28aKC-1
 5. Y. Saitou, A. A. Samarian, and O. Ishihara, Differential dust disk rotation in a complex plasma with magnetic field, APPC12, the 12th Asia Pacific Physics Conference, July 14-19, 2013, International Conference Hall, Makuhari Messe, Chiba Japan. D1-4-O4
 6. M. Shindo, A. Samarian, O. Ishihara, Dust particles trapped under the liquid helium surface, APPC12, the 12th Asia Pacific Physics Conference, July 14-19, 2013, International Conference Hall, Makuhari Messe, Chiba Japan. D1-PTh-15
 7. F. Sayed, S. V. Vladimirov, Yu. Tyshetskiy, and O. Ishihara, Modulational and filamentational instabilities of monochromatic Langmuir pump wave in quantum plasmas, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference, July 14-19, 2013, International Conference Hall, Makuhari Messe, Chiba Japan. D1-PTh-19
 8. F. Sayed, S. V. Vladimirov, Yu. Tyshetskiy, and O. Ishihara, Soliton solution of the Zakharov equations in quantum plasmas, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference, July 14-19, 2013, International Conference Hall, Makuhari Messe, Chiba Japan. D1-PTh-18
 9. 齋藤和史, A. A. Samarian, A. J. Choudhury, 石原修, コンプレックスプラズマによる渦巻構造のジェット形成実験(日本物理学会 2013 年第 68 回年次大会 (平成 25 年 3 月 26 日 - 29 日, 広島大学) 29aEA-6
 10. 眞銅雅子, 脇屋誉大, Alex Samarian, 石原修, 液体ヘリウム表面における帯電微粒子の動的挙動制御 (日本物理学会 2013 年第 68 回年次大会 (平成 25 年 3 月 26 日 - 29 日, 広島大学) 26pEF-1
 11. 中村良治, 齋藤和史, 石原修, フィラメント放電プラズマの電子温度, 平成 24 年度スペースプラズマ研究会(平成 25 年 2 月 26 日(火)~27 日(水), 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, 相模原)
 12. Y. Saitou, A. Samarian and O. Ishihara, Frozen dust waves: Evolution of dust sound speed in decaying complex plasma, 13th Workshop on fine particle plasmas (National Institute of Fusion Science, Toki, Japan, Dec.

- 7-8, 2012).
13. 石原修, コンプレックスプラズマにおける微粒子構造形成, (日本物理学会 2012 年秋季大会, 平成 24 年 9 月 18 日- 21 日, 横浜国立大学) 招待講演
 14. 齋藤和史, 中村良治, 石原修, 極低温コンプレックスプラズマ実験に向けた電子温度制御 (日本物理学会 2012 年秋季大会, 平成 24 年 9 月 18 日- 21 日, 横浜国立大学)
 15. 眞銅雅子, 脇屋誉大, 石原修, 液体ヘリウム表面における帯電微粒子の挙動制御 (日本物理学会 2012 年秋季大会, 平成 24 年 9 月 18 日- 21 日, 横浜国立大学)
 16. O. Ishihara, Low-dimensional structures in a complex cryogenic plasma, The Joint EPS/ICPP (39th European Physical Society Conference on Plasma Physics /The 16th International Congress on Plasma Physics), Stockholm, July 2-6, 2012) Invited talk. I1.304.
 17. M. Chikasue, A. Samarian and O. Ishihara, Dust acoustic waves in a diffused plasma under subzero temperatures, The Joint EPS/ICPP (39th European Physical Society Conference on Plasma Physics /The 16th International Congress on Plasma Physics), Stockholm, July 2-6, 2012). P4.131.
 18. A. Samarian, Y. Saitou, A. J. Choudhury and O. Ishihara, Dust dynamics in a strong axial magnetic field: Galaxy-like rotation, The Joint EPS/ICPP (39th European Physical Society Conference on Plasma Physics /The 16th International Congress on Plasma Physics), Stockholm, July 2-6, 2012). P4.129
 19. Y. Nakamura, Y. Saitou and O. Ishihara, Electric charges of microparticles in a complex plasma with an external magnetic field, The Joint EPS/ICPP (39th European Physical Society Conference on Plasma Physics /The 16th International Congress on Plasma Physics), Stockholm, July 2-6, 2012). P4.137
 20. Y. Saitou, Y. Nakamura, T. Kamimura and O. Ishihara, Dust Particle Trapping in a Void Boundary in the Presence of Dust Flow, The Joint EPS/ICPP (39th European Physical Society Conference on Plasma Physics /The 16th International Congress on Plasma Physics), Stockholm, July 2-6, 2012). P1.128
 21. 齋藤和史, 中村良治, 上村鉄雄, 石原修, プラズマ中の 2 次元微粒子シートに励起される波動モード, 日本物理学会 2012 年第 67 回年次大会 (平成 24 年 3 月 24 日 - 27 日, 関西学院大学) 26aGZ.
 22. 新松寛明, 中村良治, 齋藤和史, 石原修, 磁化プラズマ中微粒子の電荷測定, 平成 23 年度スペースプラズマ研究会(平成 24 年 2 月 27 日—28 日, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, 相模原).
 23. 吉田岳, 中村良治, 齋藤和史, 石原修, コンプレックスプラズマ中微粒子の温度と相関測定, 平成 23 年度スペースプラズマ研究会(平成 24 年 2 月 27 日—28 日, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, 相模原).
 24. Osamu Ishihara, Low Dimensional Structures in Complex Plasma, 12th Workshop on fine particle plasmas (National Institute of Fusion Science, Toki, Japan, Nov. 26-27, 2011).
 25. Y. Saitou, Y. Nakamura, T. Kamimura, and O. Ishihara, Observation of Wave of Two-Dimensionally Distributed Micro-Particles, 12th Workshop on fine particle plasmas (National Institute of Fusion Science, Toki, Japan, Nov. 26-27, 2011).
 26. 近未恵美, 増田政史, 眞銅雅子, 石原修, 極低温コンプレックスプラズマ中の熱泳動力による帯電微粒子拡散とその抑制, Spatial diffusion of dust particles charged in a plasma at cryogenic condition, PLASMA2011(日本物理学会 2011 年秋季大会, 平成 23 年 11 月 22 日—25 日, 石川県金沢市)
 27. 齋藤和史, 中村良治, 石原修, 上村鉄雄, コンプレックスプラズマにおけるパウシヨック形成 PLASMA2011(日本物理学会 2011 年秋季大会, 平成 23 年 11 月 22 日—25 日, 石川県金沢市)
 28. 眞銅雅子, 近未恵美, 脇屋誉大, 石原修, プラズマ中で帯電した微粒子と液体ヘリウム表面上の電子との相互作用, PLASMA2011 Interaction between dust particles charged in a plasma and electrons on liquid helium surface (日本物理学会 2011 年秋季大会, 平成 23 年 11 月 22 日—25 日, 石川県金沢市)
 29. 石原修, 林康明, 古閑一憲, 三重野哲, 高橋和生, 中村昭子, シンポジウム「微粒子プラズマ科学の新展開」 Plasma Conference 2011, Nov. 22- Nov. 25, 2011 (金沢, 石川県)
 30. M. Chikasue, M. Shindo and O. Ishihara, Thermophoretic force on charged dust particles in cryogenic complex plasma, Sixth International Conference on Physics of Dusty Plasma (ICPDP6) (Garmisch-Partenkirchen, Germany, May 16-20, 2011)
 31. N. C. Adhikary and O. Ishihara, Dust cluster rotation in cryogenic magnetized plasma, Sixth

International Conference on Physics of
Dusty Plasma (ICPDP6)
(Garmisch-Partenkirchen, Germany,
May 16-20, 2011) .

32. O. Ishihara, Y. Nakamura, Y. Saitou
and T. Kamimura, Observation of Bow
Structures in a Complex Plasma, Sixth
International Conference on Physics of
Dusty Plasma (ICPDP6)
(Garmisch-Partenkirchen, Germany,
May 16-20, 2011) .

〔図書〕(計 4 件)

1. M. Chikasue, M. Shindo and O. Ishihara,
Thermophoretic force on charged dust
particles in cryogenic complex plasma, in
*Dusty/Complex Plasmas: Basic and
Interdisciplinary Research*. AIP Conf. Proc.
1397, 337-338 (2011). (Melville, New York,
2011)
2. N. C. Adhikary and O. Ishihara, Dust cluster
rotation in cryogenic magnetized plasma, in
*Dusty/Complex Plasmas: Basic and
Interdisciplinary Research*. AIP Conf. Proc.
1397, 345-346 (2011); doi:
10.1063/1.3659835
3. O. Ishihara, Y. Nakamura, Y. Saitou and T.
Kamimura, Observation of Bow Structures in
a Complex Plasma, in *Dusty/Complex
Plasmas: Basic and Interdisciplinary
Research*. AIP Conf. Proc. **1397**, 413-414
(2011); doi: 10.1063/ 1.3659869.
4. 石原修,小特集「プラズマと微粒子」研究
の諸分野における進展(はじめに), プラ
ズマ核融合学会誌 (O. Ishihara,
Introduction, Advances in Various Fields of
"Plasma and Dust Particles", J. Plasma and
Fusion Research) Vol. **86**, 79-81 (2011).

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)
取得状況(計 0 件)

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) 連携研究者

齋藤和史 (Saitou Yoshifumi)
宇都宮大学・工学部・助教
研究者番号 : 70251080

真銅雅子 (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