

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18340186
 研究課題名 (和文) 原子・分子・輻射過程を伴うプラズマの相乗的複雑性と応用に関する研究
 研究課題名 (英文) Research on synergetic complexity and application of plasmas dominated by atomic/molecular and radiation process
 研究代表者
 岸本 泰明 (KISHIMOTO YASUAKI)
 京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授
 研究者番号：10344441

研究成果の概要： プラズマ生成に関わる複雑なダイナミクスや構造形成現象を解明するため、高温プラズマの記述に優れているプラズマ粒子手法を基礎に、それに原子・分子過程や衝突・緩和過程などのミクロな物理過程を組み込んだ拡張型統合化シミュレーションコード (EPIC3D) の開発を行った。これにより、高強度レーザーと様々な物質 (クラスターや固体薄膜など) との相互作用や放電・雷過程などにおいて現出する特異な構造を有する電離過程や分岐現象などの素過程を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2007 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2008 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：数理系物理

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：プラズマ物理

1. 研究開始当初の背景

これまで核融合や宇宙・天体を中心に、散逸の微小な高温プラズマの物性が精力的に研究されてきた。一方、自然界や実験室のプラズマに広く目を転じると、そこでは、気体や液体、固体や粉塵など、様々な状態にある物質が複雑な原子・分子過程や衝突・緩和過程を通して、中性原子や分子、多価イオンや電子など

が共存した複雑なプラズマ状態を作り出し、高温プラズマとは質的に異なった多彩なダイナミクスや顕著な構造を創出している。

雷・放電現象はその典型例であり、その突発的な発生機構や生成される微細構造は非線形物理学や非平衡統計力学の観点からも興味深い問題である。特に、近年、超高層大気で観測されるスプライトなどの放電発光現象は、それ

らが示す複雑な構造やダイナミクスとも関連して強い関心を持たれている。また、これらの過程は、雷撃や電力機器の絶縁破壊など高電圧に関わる工学現象や放電過程を利用した有害物質除去のための化学反応制御、スパーク放電やレーザーによるエンジンの点火・燃焼などの産業応用とも深く関連している。

多くのプラズマ過程はこのような原子・分子過程に関わる現象を内包しながら、これまで現象論的・経験的に扱われることが多く、必ずしも原理的な解明に至っていない。これは、これらのプラズマの挙動が極めて複雑であり、そのモデル化が困難なことに起因しているが、学術のみならず産業への応用は非常に広いことから、これを体系的に理解し、理論を構築することはプラズマ物理に残された重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、「無衝突プラズマとしてのマクロなダイナミクス」と「原子・分子過程や衝突・緩和過程、輻射過程などのデバイ長内部のミクロなダイナミクス」の結合によって作りだされる複雑かつ新奇なプラズマ過程を「相乗的複雑性」と位置づけ、この過程によって支配されるプラズマの動力学を理論的に理解するとともに、高強度レーザーと物質との相互作用や放電・雷現象を中心に、これらのプラズマ特性を生かした学術研究や応用研究を展開することを目的とする。

3. 研究の方法

これまで現象論的・経験則的に扱ってきた原子・分子過程や輻射過程が関与したプラズマ現象に対して、ミクロな原子過程とマクロなプラズマ過程を自己無撞着に連結した統合化コードを系統的に開発するとともに、これによるシミュレーションを基礎に相乗的複雑性が支配する学術・応用研究を推進する。具体的には以下の通り。

(1) 原子・分子および衝突・緩和過程を伴うプラズマ過程の理論・シミュレーションモデルの開発：

相乗的複雑性によって支配されるプラズマの特性を高精度で再現するため、マクロな無衝突プラズマの記述に優れている PIC (Particle-In Cell) を基礎に、電磁場や粒子衝突による電離過程や内殻励起やオージェ過程、輻射過程(電磁場、X線)や衝突緩和過程などのデバイ長内のミクロなダイナミクスを自己無撞着に取り入れた統合化シミュレーションコード(EPIC3D)を開発する。

(2) 放電・雷過程、プラズマ着火過程等のシミュレーション研究：開発した統合化コードにより、固体や液体、クラスターや粉塵・気体などの物質の電離・再結合過程や励起過程、プラズマ着火過程を再現する。これにより、物質がプラズマ化する際に普遍的に観測される放電・雷現象の突発的な発生機構や微細な枝葉分岐構造を中心に、相乗的複雑性によって支配されるプラズマの動力学を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 原子・緩和過程を取り入れた統合化粒子コード(EPIC3D)の開発：原子・分子過程が関与した様々なプラズマ過程とそれに伴う構造形成現象を高精度で再現する粒子手法に基づく統合化コード(EPIC3D: 3-dimensional Extended Particle based Integrated Code)を開発した。

具体的には、プラズマを構成する超粒子に対して各原子の量子レベルに対応する内部自由度を持たせることにより、種々の電離・再結合過程や衝突緩和過程をモデル的に取り入れた。また、粒子間の衝突は、相対論領域において運動量およびエネルギーを厳密に保存する同種および異種粒子の pairing とモンテカルロ法を併用することによって実現した。

また、衝突過程において pairing 法を使用していることを利用し、電子衝突による電離過程については、電子-原子/イオンの pair を利用してモンテカルロ法により行った。これら電子衝突電離や電磁場によるトンネル電離に加え、単一光子および多光子吸収による光電離過程やX線

による内殻電離過程、Auger 過程を導入し、遠紫外から EUV 領域、X線領域の幅広い波長領域における電離素過程を統一的に扱うことができるコードに発展させた。これにより、可視光領域に加え、EUV や X 線領域の電磁波やレーザーと物質との相互作用を含む短波長領域の高エネルギー密度科学の研究に資することができるようになった。特に、放電・雷過程では EUV 領域の輻射が電離波の伝播や構造形成に重要な役割を果たすことや、現在、理化学研究所等で開発が進められている高強度 X 線自由電子レーザーと物質との相互作用研究が進展していることから、これらの分野の研究に貢献することができる[研究成果(4)を参照]。

(2) 強度レーザーとクラスターとの相互作用

原子クラスターは少数多体系として興味深い研究対象であり、特に、これらクラスター媒質とレーザーとの相互作用では、クラスターの表面に励起される分極モードやそれにとまなう電磁波の伝播現象など、様々な新奇な物性が報告されている。ここでは、EPIC3D を用いて、高強度極短パルスレーザーとアルゴン (Ar) クラスターとの相互作用の詳細を調べ、電離過程を伴ったクラスターの内部構造やクーロン爆発のダイナミクス(高価数イオンの生成や速度分布関数など)の過程を明らかにした。

図 1(a)は、レーザーとクラスターの相互作用における各時間の電場振幅の等高線を示している。レーザー場は、初期はクラスター内部に浸透するが、電離の進行とともにレーザー場は掃き出される[図(a1)]。その後、多量の電子がクラスター表面から剥ぎ取られ、クラスター表面に両極性電場が発生する[図(a2)。このときの電場強度は最大 $6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ に達するが、この値は真空中におけるレーザー場の最大強度 $2.7 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ を一桁以上(~ 22 倍)上回り、16

価のイオン (Ar^{16+}) を生成できる強度に達している。実際、その時刻においてクラスターの両極に強電場が生成され、その領域に Ar^{16+} の多価イオンが発生している[図 2(b1)(b2)]。レーザーパルスが通り過ぎると、クラスター内部および外部に電場シースが形成されることが分かった[図(a3)]。これらの過程で生成される多価イオンの加速やエネルギー分布の詳細も明らかにした。

昨今、レーザーとクラスターとの相互作用による高エネルギーイオンの生成がイオン粒子加速の観点から注目を集めているが、本研究成果が重要な役割を果たすことになる。

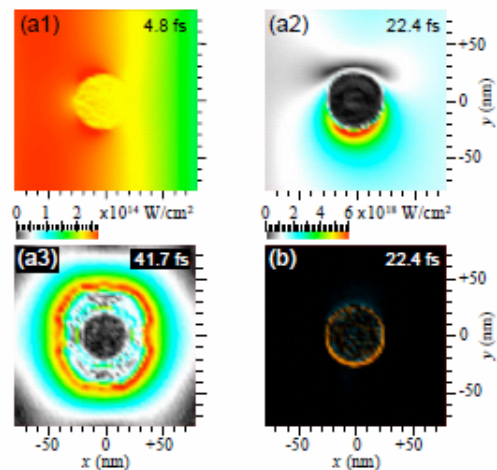


図 1 (a1) $t=4.8\text{fs}$, (a2) 22.4fs , (a3) 41.7fs における電場分布, および (b) $t=22.4\text{fs}$ における電荷密度分布

(3) 高強度レーザーと固体炭素との相互作用

原子過程を取り入れた EPIC3D をより、高強度レーザーに照射された固体炭素の電離過程のシミュレーションを実現し、レーザー光が伝播しない固体内部において、電離波によって航跡場(プラズマ波)が励起され、それによって電離波面が自己維持される電離波伝播の新しい物理機構を発見した。

図 2 は、高強度レーザーに照射された固体炭素薄膜中で電離波伝播の様子を示し、それぞれ固体炭素中における(a) プラズマ密度分布と

(b) 励起された航跡場の空間分布を示している。電離波先端のプラズマ生成に伴う急峻な圧力(密度)勾配[図 2(a)]によって航跡場が励起され、この航跡場によるトンネルイオン化によって比較的low価数(1-4 価)の電離波が伝播・維持されることが分かった。この電離波の伝播速度は、それに引き続いて起こる電子衝突による高価数(5・6 価)の電離に比べると速く、光速の 2/3 に達する。航跡場は、図 2(b)に示されているように、扇方構造を示し、横方向にも伝播している様子が分かる。高価数(5・6 価)の電離波伝播に寄与している高エネルギー電子は同時に熱輸送も担っており、電離波と固体中でのエネルギー輸送が結合して進展することが分かった。

これらの電離波の発生機構とそれともなうプラズマ生成過程は、極短パルス・高強度レーザーと物質に普遍的な物理過程であり、様々な応用研究の基礎をなすものである。

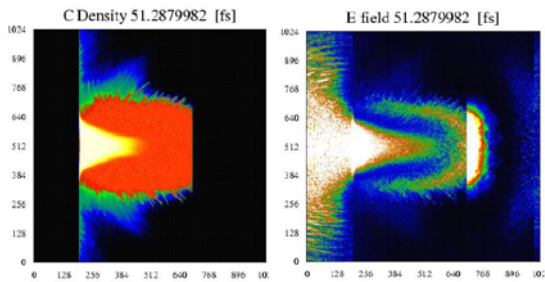


図 2 高強度レーザーに照射された固体炭素内部の(a) 密度分布と(b) 航跡場の強度分布。

(4) 短波長領域(紫外・EUV・X 線)の高エネルギー密度科学: X 線自由電子レーザー(XFEL)に照射された生体分子のダイナミクス研究

X線自由電子レーザー利用研究の一つとして「生体分子の立体構造決定手法の開発に向けた理論基盤の構築」(研究代表者:JAEA 量子ビーム応用研究部門・郷信広)に参画し、EPIC3D によるシミュレーションによりX線内殻電離プラズマのダイナミクス研究を推進した。X線自由電子レーザーによる生体高分子の回折像を高精度で

取得するためには、 10^{22-24} photon/pulse/mm² レベルの高強度X線を照射する必要があるが、この際、X線が内殻電離過程により吸収されると10keV レベルの高エネルギー電子が発生し、それにより生体高分子が破壊される可能性がある。本研究では、生体高分子を同サイズのクラスターに見立て、X線レーザーとクラスターとの相互作用シミュレーション EPIC3D を用いて行うことによりこの過程を解析した。

X 線レーザー強度が 10^{22} photon/pulse/mm² で半径 20nm の炭素クラスターに照射すると、X線レーザーは内殻電離および Auger 過程を通して数 fsec の間にプラズマ化し、余剰エネルギーとして 10keV の高エネルギー電子が発生する。この高エネルギー電子がクラスターから飛散することにより TV/m レベルの電場がクラスター表面に形成され、この電場によって電離が進行することを明らかにした。図 3 はX線レーザー強度に対する原子に捕捉された未電離の電子数の割合を示している。X 線レーザーによって高分子の回折像を得るためには、高分子を構成する原子が捕捉電子が十分に存在する必要がある。この解析から、優れた回折像を得るためにはX線レーザー強度を 10^{20} photon/pulse/mm² レベルに制限する必要があることが示された。本研究成果は、本利用研究プロジェクトの方針に影響を与える重要な結果と位置づけられる

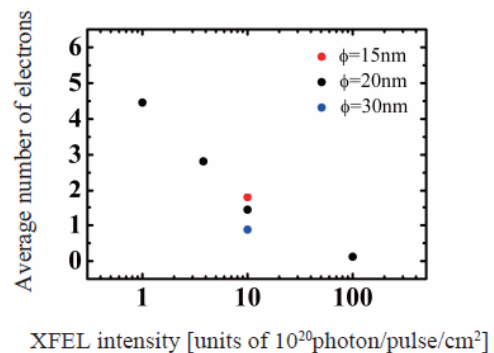


図 3 X 線レーザー強度に対する原子に捕捉された電子の割合。レーザー強度の増大に伴い、捕捉電子の割合が減少する。

(4) 放電過程における構造形成

近年、地球大気や電離層で観測される放電・雷現象が注目を集めている。雷の発生過程において相対論領域の高エネルギー電子やガンマ線の放出なども観測されている。本研究では、EPIC3D を用いて、高圧ネオンガス($Z=10$)中での放電シミュレーションを行い、放電に関わる複雑なプラズマのダイナミクスを明らかにした。

図4は、高圧ネオンガス(密度: $4.6 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$)に静電界($1.1 \times 10^7 \text{V/cm}$)を印加したとき、初期に配置した Ne^{+2} の微小な電離スポットから放電が進行する様子を示している。領域は、 $(x,y) = (80 \mu\text{m}, 225 \mu\text{m})$ である。放電初期から Ne^{+1} のイオン密度は緩やかに増大し、 $t=43 \text{psec}$ 近辺を境に爆発的に増大する。そのとき2価以上のイオンは、1価イオンの急激な成長に牽引され、1価を上回る高い成長率で生成することが分かった。初期の電離スポットから streamer 様の枝構造が緩やかに成長するが、 $t=43 \text{psec}$ 近辺で多数の枝葉は互いに連結を強め、空間の広い領域で同時的・非局所的に伝播する様々なスケールの枝葉構造が混在した網状の集合体となる[図9(b)(c)]。

図4(d)は、緩やかな電離成長段階($t=42 \text{psec}$)におけるイオン粒子の空間分布を示している。初期の電離スポットから離れた場所に多くの微小なスポットが広範囲に分布している様子が分かる。このスポット数の空間充填率がある閾値を超えると近接した電離スポット間でマイクロな放電が同時かつ大域的に起こり、それが空間全体に渡って伝播することにより爆発的な電離現象が引き起こされると考えられる。これらの過程は「パーコレーション」や「森林火災」の問題に類似している点は興味深い

また、“streamer”を構成する枝葉経路には電流が駆動されることから電磁波が放射される。図5は $t=45.9 \text{psec}$ における枝葉構造に流れる電流によって駆動される誘導磁場の空間分布をその波数スペクトルを示している。パワー則様の分

布が形成されている様子が分かる。これは、放電に伴う枝葉構造が特定のスケールを持たないフラクタル構造を有している可能性を示しており、実際、大気中の雷から放射される電磁波においても同様のスペクトルが観測されている。

これらは、放電・雷発生もにおける突発的な発生やその時定数、複雑の枝葉構造の起源に直結するものであり、このシミュレーションに基づいて理論モデル構築の試みは進められている

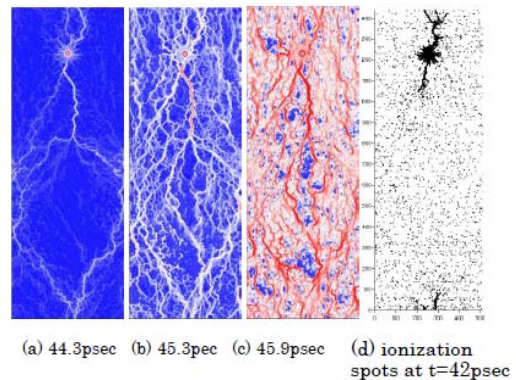


図4 (a) 44.3psec, (b) 45.3psec, (c) 45.9psec におけるイオンの電荷密度分布. (d) 雪崩に先立つ $t=42 \text{psec}$ でのプラズマ化したイオンの分布. 雪崩に先立って空間全体に渡ってイオンの電離スポットが形成されている。

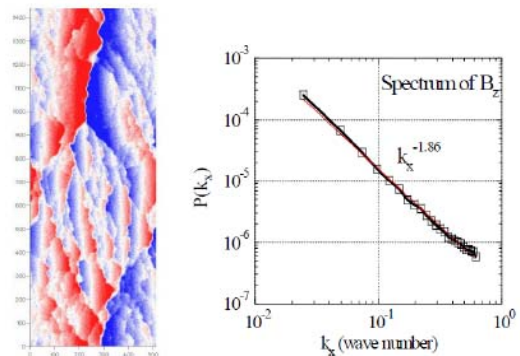


図5 雪崩を発生している $t=45.3 \text{psec}$ での自己生成磁場 (B_z) の空間分布 (左) と波数スペクトル (右). $k_x^{-1.86}$ のパワー則が観測される。

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 岸本泰明, “物質の電離ダイナミクスと構造形成のシミュレーション”, プラズマ・核融合学会雑誌 **84**, No.8, 484-491(2008). 査読無
- ② S. Kato, I. Okuda, E. Takahashi, Y. Mastumoto, A Computational study of the decomposition of carbon tetrafluoride in wet argon under electron beam irradiation, Plasma and Fusion Research **3**, 038 (2008). 査読有
- ③ 加藤進, 高橋栄一, 佐々木明, 岸本泰明, “放電・雷における原子・分子過程のモデル化”, プラズマ・核融合学会雑誌 **84**, No.8, 477-483(2008). 査読無
- ④ 岸本泰明, “原子・緩和過程を伴うプラズマの相乗的複雑性と放電・雷現象への応用”, 放電研究 **50**, No.2, 36-41(2007). 査読無
- ⑤ S. KATO, E. TAKAHASHI, Y. MATSUMOTO and I. OKUDA, Effects of Laser Wavelength on Interaction of Ultrashort Intense Laser with Finite-Scale Length Dense Plasmas, Plasma and Fusion Research **2**, 032(2p)(2007). 査読有
- ⑥ Y. Kishimoto and T. Masaki, A paradigm of kinetic simulation including atomic and relaxation processes -A sudden event in lightning process-, J. Plasma Physics **72** (part 6), 971-974 (2006). 査読有
- ⑦ T. Masaki and Y. Kishimoto, Ionization dynamics in high power laser-matter interaction, J. Plasma Physics **72** (part 6), 1291-1294(2006). 査読有
- ⑧ Y. Fukuda, Y. Kishimoto, T. Masaki, and N. K. Yamakawa, Structures and dynamics of cluster plasmas created by ultrashort intense laser fields, Phys. Rev. A **73**, 031201(R)(1-4) (2006). 査読有
- ⑨ S. Kato, S. Masuda, E. Miura, (他4名、1番目), Particle-in-cell simulations of high-energy electron production by intense laser pulses in underdense plasmas, J. Phys. IV France **133**, 1143 - 1145 (2006). 査読有
- ⑩ M. Adachi, E. Miura, Susumu Kato, (他6名、3番目), Cascade Acceleration of Electrons by Laser Wakefield and Direct Laser Field, Japanese Journal of Applied Physics **45**, 4214 - 4218 (2006). 査読有

[学会発表](計 5 件)

- ① 岸本泰明, “高強度レーザーによる固体中の航跡場生成と電離波の自己維持”, 日本物理学会 第 64 回年次大会 立教学院池袋キャンパス(平成 21 年 3 月 27 日).
- ② M. Chen, D. Saito, J.Q. Li, and Y. Kishimoto, “Theory and simulation of non-local thermal smoothing for arbitrary scale length modulation”, 22nd IAEA Fusion Energy Conference (Palace of Nations of the United Nations Office, Geneva, Switzerland), October 16, 2008.
- ③ 中村龍史, 福田祐仁, 岸本泰明, “XFEL 光とクラスターターゲットとの相互作用による光

電離プラズマのダイナミクス”, 日本物理学会 2008 年秋季大会 岩手大学上田キャンパス (平成 20 年 9 月 22 日)

- ④ 斎藤大介, Chen Mo, 李継全, 岸本泰明, “高強度レーザーに照射された物質の電離と熱緩和のダイナミクス”, 日本物理学会 2008 年秋季大会 岩手大学上田キャンパス (平成 20 年 9 月 22 日)
- ⑤ 岸本泰明, “レーザープラズマの直接粒子シミュレーション”, 2006 年放電学会年次大会 (芝浦工業大学豊洲キャンパス)、特別招待講演 SS-1(平成 18 年 11 月 20 日).

[その他]

ホームページ等

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kishi/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

岸本 泰明 (KISHIMOTO YASUAKI)
京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授
研究者番号:10344441

(2)研究分担者

前川 孝 (MAEKAWA TAKASHI)
京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授
研究者番号:20127137
李 継全 (LI JIQUAN)
京都大学大学院エネルギー科学研究科・准教授
研究者番号:00437253

(3)連携研究者

内海 隆行 (UTSUMI TAKAYUKI)
山口東京理科大学・教授
研究者番号:50360433
加藤 進 (KATO SUSUMU)
産業技術総合研究所・エネルギー技術
研究部門・主任研究員
研究者番号:20356786
福田 祐仁 (FUKUDA YUJI)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究部門・研究員
研究者番号:30311327
佐々木 明 (SASAKI AKIRA)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究部門・研究員
研究者番号:10215709
坂本 慶司 (SAKAMOTO KEIJI)
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発
部門
研究者番号:90343904