

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25287153

研究課題名(和文) 輻射減衰領域でのレーザー物質相互作用による新物質状態の創成と応用研究の開拓

研究課題名(英文) Generation of new material states and associated applications due to the interaction with a laser in the radiation damping regime

研究代表者

岸本 泰明 (Kishimoto, Yasuaki)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：10344441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：超高強度レーザーと物質の相互作用は、物質種と状態を適切に選択すれば(構造的媒質として参照)、高強度電磁放射場、多価イオン、高エネルギー電子が強く結合した新しい物質状態(極限輻射プラズマ)を創成できる可能性がある。この着想に基づいて本研究では、高強度レーザーと構造的媒質との相互作用で現出する電離、輻射、衝撃波形成、高エネルギー粒子生成などの素過程を明らかにするとともに、高圧背景ガスや高強度磁場と併用することによって媒質の自己組織化機能を現出させ、音速で評価される慣性時間を上回った高エネルギー密度状態のプラズマの生成が可能なことを示した。これらは高エネルギー密度科学の進展に資する成果である。

研究成果の概要(英文)：The interaction between high intensity laser and material, if the kind and the state are chosen properly, which we refer to it as a structured medium, leads to a new material state, i.e. the extreme radiation plasma, where high intensity electromagnetic photon fields, multiply charged ions, high energy electrons, etc. are tightly coupled. Based on this idea, in this research, we elucidate elementary processes of ionization, radiation, shock wave formation, high energy particle acceleration, etc, which emerge as a result of the interaction between the high intensity laser and the structured medium. Furthermore, by utilizing self-organization characteristics of the medium incorporated with high pressure ambient gas and/or high intensity magnetic field, we have successfully shown that a plasma with high energy density state can be produced exceeding the inertia time evaluated by the sound speed. This is the result that advances the understandings of high energy density science.

研究分野：数物系科学

キーワード：高強度レーザー レーザープラズマ 高エネルギー密度科学 輻射減衰 輻射プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

これまで、宇宙や天体、核融合や産業応用などで様々な温度・密度領域のプラズマが研究され、多彩なダイナミクスと構造を創出するプラズマの特性が探求されてきた[8]。中でも、集光強度が $10^{18-20}\text{W}/\text{cm}^2$ の高強度レーザーにより生成される相対論プラズマは21世紀に入って本格的に研究が進展した分野であり、電子の相対論効果が主要な役割を果たす媒質としてプラズマ物理学の一端を担い、様々な学術・応用研究がもたらされた。

一方、近年の大型光学素子技術や極限集光技術などの目覚ましい発展により、従来を大きく上回る $10^{21-23}\text{W}/\text{cm}^2$ の超高強度レーザーが視野に入りつつある。この領域のレーザーを物質に照射すると、物質は複雑な原子過程を通してプラズマとなるとともに、その集団運動を通して準コヒーレントな高強度の静電場や電磁場を励起・生成する。さらに、強い加速度を受けた電子群は高強度の放射(X線・ガンマ線)を放出すると同時に、その反作用を受けて運動エネルギーの大きな割合を失う放射減衰領域に入る。

このような高エネルギー密度状態を有限時間、閉じ込めることができれば、これまでに例のない高強度・広帯域の電磁場・放射場、相対論的高エネルギー電子、多価イオンが動力学レベルで強く結合した新しい物質状態を創成できる。この状態は、電磁場・放射場と荷電粒子が混在した高エネルギー密度の乱流状態を作り出し、自己組織過程を通してプラズマ流や磁場渦などのコヒーレントな構造やダイナミクスを創出する可能性がある。以下、このような電磁場や放射場と荷電粒子が強く結合した状態を、従来プラズマと区別して「極限放射プラズマ」として参照する。

この極限放射プラズマ実現の着想に至った以下の背景がある。(1)原子過程や衝突過程を取り入れたシミュレーション手法が開発され、これを発展させれば、極限放射プラズマを高精度で再現・予測できる可能性があること、(2)少数多体系に分類されるクラスター(粒状物質)からなる媒質がレーザーとの相互作用で特異な特性を示すこと分かり、これまで使用されてきた気体や固体に加えて、目的に適合した物質種や物質状態に対する選択の自由度が向上したこと、(3)多様な構造を有するターゲット生成技術や超高強度領域においてターゲットとの相互作用を制御できる超高コントラストのレーザー実験・計測技術が進展したことなどである。これらの結果、高価数(Z)の物質からなるクラスター媒質が極限放射プラズマの実現に適した物質状態であり、これを指導原理として、上記(1)-(3)を有機的に活用・統合すれば極限放射プラズマの学術基盤と応用研究を現実的に展開できるとの着想に至った。

### 2. 研究の目的

近年のレーザー技術の進展によって視野に入りつつある集光強度が $10^{22-10^{23}}\text{W}/\text{cm}^2$ 領域の超高強度レーザーと物質の相互作用は、物質種と物質状態を適切に選択すれば、これまで地上ではない高強度の電磁場・放射場、電子・陽電子、多価イオンが強く結合した新しい物質状態(極限放射プラズマ)を創成できる可能性がある。本提案は、少数多体系であるクラスター媒質が極限放射プラズマを実現する物質状態であるとの着想のもと、理論と実験で検証された多階層モデルに基づいて、このプラズマを支配する物理法則と制御手法を解明することにより、新領域のプラズマ物理学とそれが本質的役割を果たす応用研究を展開することを目的とする。

### 3. 研究の方法

上記目的に従い、クラスター媒質と高強度レーザーの相互作用によって生成される極限放射プラズマを前述の三つの素過程( )に要素還元し、各素過程を同定・検証する

数値シミュレーション手法と基礎実験を開拓するとともに、それらを統合することにより極限放射プラズマの全容を明らかにする。このため、原子物理学や計算科学、高強度レーザー実験分野の研究者と連携し、

- 極限放射プラズマの多階層数値モデルとシミュレーション体系の構築、
- 基礎実験との比較による極限放射プラズマの理論・数値モデルの同定・検証、
- レーザーとクラスター媒質の相互作用の解明と極限放射プラズマ生成の可能性追求、
- 極限放射プラズマの総合理解と予測・制御の理論体系の構築

に関する研究を推進する。また、これらの研究成果に基づいて、極限放射プラズマをレーザー実験において実現する検討を行った。

### 4. 研究成果

極限放射プラズマは様々な時空間スケールの物理過程が関与した多階層・複合系と位置付けられ、それを支配する基礎過程は、原子過程(電離・再結合過程)や衝突・緩和過程、X線・ガンマ線などの放射・伝播過程や放射減衰過程、電子・陽電子生成や核反応過程、中性子発生など、様々である。その解析には、それらの素過程を取り入れた高精度のシミュレーションコードが重要な役割を果たす。現在、国内外において、これらの物理過程を取り入れたシミュレーションコードの開発が精力的に進められているが、これまで、当該研究者を中心に、プラズマ粒子コードを基礎に、これらの素過程を取り入れた拡張型統合粒子コード(EPIC3D: Extended Particle based Integrated Code)の開発を推進してきた。本研究では、これまでEPIC3Dにすでに実装されている場電離(トンネル電離・多光子電離)や電子衝突電離、内殻電離・オーグェ過程、電子・中性粒子衝突などの電

離過程、2体衝突モデルによる同種・異種間荷電粒子のクーロン衝突効果に加えて、制動放射 X 線や中空原子・電子遷移 X 線過程、輻射減衰効果などを導入し、以下のシミュレーションを実施した[3-7]。

1) 高強度レーザーに照射された固体炭素薄膜の電離波伝播に関する研究[3]

高強度極短パルスレーザー(パルス長: 40fsec、集光強度;  $10^{19-20}$ W/cm<sup>2</sup> 領域)と固体炭素薄膜との空間1次元および2次元の相互作用シミュレーションを行い、固体内部の電離過程の解析を行った。その結果、レーザーによって固体表面で加速された高エネルギー電子群の伝播とそれに伴って生成される電場が固体内部に多段的な電離波を形成し、それにより固体が完全電離に近いプラズマ状態に移行することを見出した。具体的には、4 価までは場電離による短いスケール長の電離波の形成とその光速オーダの伝播、5 価・6 価は電子衝突による長いスケール長の電離波の形成とその高速伝播によって支配されることを見出した。

また、高エネルギー電子によって駆動されるプラズマ波(航跡場)による場電離も電離過程に影響を与えることを示した。また、そのような電離過程のレーザー強度依存性、レーザーの偏光の違い(円偏光)による電離過程の相違、そのような電離過程を記述する理論モデルについても議論している。

さらに、アルミニウムの固体薄膜に同様の高強度レーザーを有限のスポット幅で照射した場合の横方向の電離過程を含む2次元シミュレーションを実施した。その結果、アルミニウムに対しても縦方向の多段的な電離過程を観測するとともに、発生した高エネルギー電子が固体薄膜の両面に形成されるシース電場に閉じ込められ、それが固体薄膜中を横方向に伝播して、その方向にも電離波が縦方向より遅い時定数で形成されることを明らかにした。

中性媒質からプラズマが生成される過程は、それ以降の物理過程の初期条件と位置付けられ、極短パルス高強度レーザーと物質との相互作用の基礎と位置付けられる。

2) 高強度レーザーと各種固体物質薄膜の相互作用と電離過程に関する研究(6)

高強度レーザーと様々な元素(C, Al, Fe, Xe, Au)の固体薄膜(3 $\mu$ m)との相互作用シミュレーションを行い、重元素毎の平均電離度とその電離過程について解析を行った。レーザー強度( $a_0=4$ )に対して、各元素の電子密度をレーザー遮断密度の10倍となるように原子密度を固定した。低価数の炭素では薄膜全体が完全電離するのに対して、高価数の原子になるに従って部分電離状態で飽和する。これは、各元素の持つイオン化エネルギーが増加することに起因しており( $Z^2$ )、重元素(高Z)の媒質であるほど、Q/M に比例する加速度

は低くなることを意味し、これが重イオン加速の特性を左右する。相互作用は非平衡・非定常であり、場電離と衝突電離の割合は3 $\mu$ mの薄膜に対しては共に50%前後である。

3) 高強度レーザーと重元素ターゲットの相互作用とイオン加速(6)

高強度レーザーに照射された高Zターゲットの電離構造と多価イオンの生成・加速の研究を進展させ、高強度レーザーと金などを含む固体重元素薄膜との相互作用シミュレーションを行い、その電離過程と生成される高価数の多価イオンの加速機構の解析を行った。その結果、固体表面の電子に作用する高強度レーザーの放射圧とそれに伴う電場によって電離・加速される高価数の多価イオンと固体表面で生成された高エネルギー電子が固体裏面に生成するシース電場によって高価数に電離・加速される多価イオンの両者が生成されることを見出すとともに、それら両者の機構で生成される多価イオンの価数分布特性と最大加速エネルギーの理論モデルなどを導いた。

特に、最大価数の多価イオン(Z~71)は固体表面で生成される一方、最大エネルギーの多価イオン(Z~69)は固体裏面で生成されること、また、これらは裏面に付着した水素や水などの影響を強く受けることを見出した。

4) 輻射減衰領域の高強度レーザーと構造性媒質との相互作用[6]

高強度レーザーに照射された炭素クラスター(2次元ロッド群:半径が330nm)と超高強度レーザー( $a_0=200$  ( $I=8.1 \times 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>))との相互作用シミュレーションをEPICにより実施した。

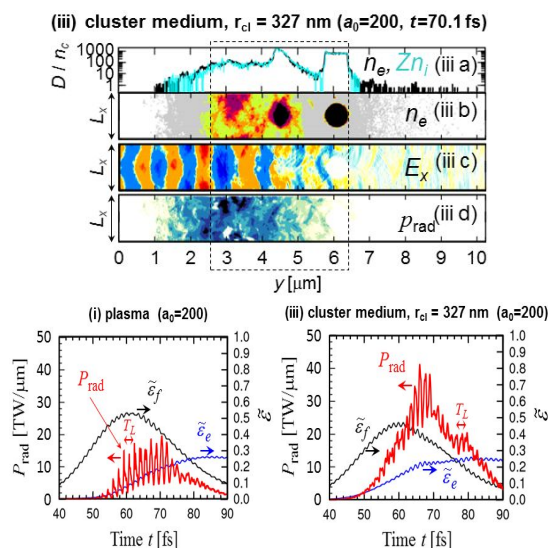


図3 上図:炭素クラスター半径330nmのクラスター媒質と高強度レーザーとの相互作用時における a) 1次元の電子とイオン密度、b) 2次元電子密度分布、c) レーザー電場分布、d) 輻射減衰による放射パワー密度分布を示す。下図:(i) 一様プラズマの場合と(ii) クラスター媒質(上図)の場合の輻射パワー(赤)、レーザーエネルギー(黒)、電子エネルギー(青)の時間発展(文献[9])

図1は、レーザー照射側でクラスターが崩壊するとともに、それに伴って広い領域で輻射が発生している様子を示す。下図はレーザー強度と発生する輻射の時間発展を、一様プラズマの場合とクラスター媒質の場合について比較した結果を示している。クラスター媒質の場合は、一様プラズマの場合に比べて、より多くのエネルギーが電子を介して輻射場に変換される(積分量で約3倍)。その結果、高い輻射減衰とそれによるガンマ線発生が実現している。

#### 5) クラスター内無衝突衝撃波による単色プロトン加速[1,2](2,3)

$10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 領域の集光強度が可能な J-KAREN-P(量子科学研研機構)レーザーの特性を生かした、高繰返しでの超高純度プロトンビームの開発を目指し、サブミクロンサイズの水素クラスターターゲットと高強度レーザー( $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>)の相互作用シミュレーションを行い、200MeVを上回る単色プロトン生成の可能性を示すとともその物理機構を明らかにした。レーザー照射されたクラスターは、クラスター表面のレーザー照射側に無衝突衝撃波を生成し、それがクラスターの中心に向かって伝播・収束する。

この過程で、中心領域でのイオン密度および静電ポテンシャルが増大し、これにより衝撃波上流のプロトンは反射・加速されるとともに、レーザー集光強度の上昇とともに電子の相対論効果によって衝撃波構造は維持され、プロトン加速はさらに強調される。これらのプロトンは、クラスターのクーロン爆発電場により追加速され、290 MeV に達する高エネルギー準単色成分( $\delta E \sim 7\%$ )を形成することが分かった。

上記のシミュレーション結果を実験において再現することを目指し、超高純度プロトンビーム生成のためのサブミクロンサイズの水素クラスターターゲットの開発に着手し、これまでに、半径0.17~1.0 $\mu$ mの水素クラスターの生成に成功している。

#### 6) クラスター媒質中での無衝突プラズマ境界層の構造とダイナミクス(1-3)

クラスター媒質(クラスター+背景ガス)に高強度レーザーを照射することで、クラスターイオンと背景ガスイオンとの接触面近傍に無衝突プラズマ境界層が形成される。本研究では、相対論的電磁粒子コーEPIC3Dを用いて、最大集光強度が、 $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>の高強度レーザーとクラスター媒質(直径0.25 $\mu$ mの単一炭素クラスター+背景水素ガス)との相互作用を模擬する2次元シミュレーションを行い、無衝突プラズマ境界層で生成する電場構造、および、量子科学研研機構で行われたクラスター媒質を用いた背景ガスイオン加速実験の加速メカニズムについて調べた。

#### 7) 高強度磁場中における高強度レーザーとプラズマとの相互作用 [4,5](5)

高速点火方式のレーザー核融合、レーザー駆動の高エネルギー粒子加速やテラヘルツ領域を含む高輝度輻射源など、相対論領域の高強度レーザーとプラズマとの相互作用研究において、それらの効率や制御性の向上の観点から、近年、生成が可能となってきた KT オータの外部磁場印加がもたらす物理現象の解明とその理論基盤構築に関する研究を EPIC によるシミュレーションと併用して行った。

7-1: レーザー伝播と同方向にキロテスラ KT オータの縦磁場を印加した場合の亜臨界磁化プラズマと高強度レーザーとの相互作用に関する粒子シミュレーションを行い、ファラデー回転、左・右回り円偏波、ホイスラー波など、磁場印加に伴う波動構造の変化に着目し、レーザー場の線形および非線形伝播・吸収特性やプラズマ加熱特性の詳細を調べた。その結果、これらの特性は磁場印加に伴う波動構造の変化に伴って大きく変化することが分かった。具体的には、最大吸収率を与える最適な磁場強度が存在すること、10kTを上回る強磁場領域では、伝播モードである右回り円偏波成分が、相対論的電子サイクロトロン波共鳴加熱(ECR)によって、比較的弱いレーザー強度でも80%を上回る高い吸収率を示すこと、さらに高磁場になるとレーザーが短波長のホイスラー波に変換され、伝播・吸収されることなどが分かった。レーザーは磁場がなければ遮断される高密度プラズマでもホイスラー波として伝播できることから、これまでの相互作用の描像を大きく変えるものである[4]。

7-2 上記に関連して、大吸収率を与える磁場強度付近での相互作用を調べたところ、プラズマ中に波長オータで長時間存在する孤立波(ソリトン)が励起され、それが吸収率の増大に寄与していることが分かった。このソリトンは密度キャビティを形成し、その中で右回り円偏波として存在していること、周波数がレーザー場より低周波側に変位していること、プラズマ中で停留したり移動したりするなど、特異な運動を示すことなどを明らかにした。また、ソリトンに関わる相互作用を理論的に記述するため、イオン運動効果および有限温度効果を取り入れた磁化プラズマ中でのソリトンを記述する理論モデルを構築し、磁場強度の増大とともに局在性の高いソリトンが形成されるシミュレーションを再現する結果を得た[5]。

#### 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13件)

[1] Jinno S., Kanasaki M., Uno M., Matsui R., Uesaka M., Kishimoto Y., Fukuda Y., Micron-size hydrogen cluster target for laser-driven proton acceleration, Plasma Physics and Controlled Fusion **60**, 044021(2018), 査読有, 10.1088/1361-6587/aaafa8

[2]Jinno S., Tanaka H., Matsui R., Kanasaki M., Sakaki H., Kando M., Kondo K., Sugiyama A., Uesaka M., Kishimoto Y., Fukuda Y., Characterization of micron-size hydrogen clusters using Mie scattering, Optics Express **25**, 18774 - 18783(2017), 査読有, 10.1364/OE.25.018774

[3] D. Kawahito, Y. Kishimoto, Multi-phase ionization dynamics of carbon thin film irradiated by high power short pulse laser, Physics of Plasmas **24**, 103105(2017), 査読有, 10.1063/1.4986034

[4] Wu Feng, J.Q. Li and Y. Kishimoto, Theory on Bright and Dark Soliton formation in Strongly Magnetized Plasmas, Physics of Plasmas **23**, 092115 (2016), 査読有, 10.1063/1.4962846

[5] Wu Feng, J.Q. Li and Y. Kishimoto, Laser propagation and soliton generation in strongly magnetized plasmas, Physics of Plasmas **23**, 32102(2016), 査読有, 10.1063/1.4942789

[6] N. Iwata, H. Nagatomo, Y. Fukuda, Ryutaro Matsui and Yasuaki Kishimoto, Effects of radiation reaction in the interaction between cluster media and high intensity lasers in the radiation dominant regime, Physics of Plasmas **23**, 063115 (2016), 査読有, 10.1063/1.4954152

[7] D. Kawahito and Y. Kishimoto, Ionization and acceleration of heavy ions in high-Z solid target irradiated by high intensity laser, Journal of Physics: Conference Series **717**, 012066 (2016), 査読有, 10.1088/1742-6596/717/1/012066

[8] P. P. Hilscher, K. Imadera, J.Q. Li and Y. Kishimoto, The effect of weak collisionality on damped modes and its contribution to linear mode coupling in gyrokinetic simulation, Physics of Plasmas **30**, 1303151(2013), 査読有, 10.1063/1.4819033

[学会発表] (計 57 件)

(1) 松井隆太郎, 福田祐仁, 岸本泰明, クラスター媒質中で生成する無衝突プラズマ境界層における準安定非線形波の形成とイオン加速, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018

(2) Y. Kishimoto, D. Kawahito, R. Matsui, T. Okihara, H. Sakaguchi, K. Fukami and Y. Fukuda, Generation of self-organized high energy density plasma by the interaction between high intensity laser and structured medium, The 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2017), 2017

(3) R. Matsui, Y. Fukuda and Y. Kishimoto, Generation of quasi-monoenergetic protons exceeding 200 MeV via intra-cluster collisionless shocks in a laser-irradiated micron-size H<sub>2</sub> cluster, The 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2017), 2017

(4) Y. Kishimoto, D. Kawahito, T. Okihara, H. Sakaguchi, K. Fukami and Y. Fukuda, Confinement of high energy density plasma produced by the interaction between high intensity laser and structured medium, Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2017), 2017

(5) Wu Feng, D. Kawahito, Y. Kishimoto, Dispersion properties in laser- induced magnetized plasmas, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017

(6) 川人大希, 岸本泰明, 榊泰直, 西内満美子, 福田祐仁, 高強度レーザーと重元素物質との相互作用による高価数イオンの生成・抽出, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016

(7) Y. Kishimoto, 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space and Astrophysical plasmas, Characteristics of radiation in non-equilibrium plasma produced by high intensity laser, 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical plasmas, 2016

(8) Y. Kishimoto, Non-equilibrium extreme radiation plasmas produced by the interaction between high power laser and heavy element materials, Specialized International Conference in OPTICS & PHOTONICS International Congress (OPIC) , 2016

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 連携研究者

今寺 賢志 (IMADERA, Kenji )  
京都大学・エネルギー科学研究科・助教  
研究者番号 : 90607839

福田 祐仁 (FUKUDA, Yuji )  
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究

部・上席研究員  
研究者番号：30311327

森林 健悟 (MORIBAYASHI, Kengo)  
国立研究開発法人量子科学技術研究開発  
機構・関西光科学研究所 量子生命科学研  
究部・上席研究員  
研究者番号：70354975

田口 俊弘 (TAGUCHI, Toshihiro)  
摂南大学・理工学部・教授  
研究者番号：90171595

加藤 進 (KATO, Susumu)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・  
電子光技術研究部門・主任研究員  
研究者番号：20356786

中井 光男 (NAKAI, Mitsuo)  
大阪大学レーザー科学研究所・高エネルギー  
密度科学研究部門・教授  
研究者番号：70201663