

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0072

研究課題名（和文）最先端レーザー光による物質加熱過程の解明を目指したPICLSコードの国際共同開発

研究課題名（英文）Revealing high intensity laser driven isochoric heating by developing PICLS code in international collaborations

研究代表者

千徳 靖彦（Sentoku, Yasuhiko）

大阪大学・レーザー科学研究所・教授

研究者番号：10322653

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：プラズマは荷電粒子の集合体である。強いレーザー光が作り出す高い密度とエネルギーを持つプラズマは、非平衡状態にあり個々の粒子が電磁波であるレーザー光にどのように応答し、集団的に振る舞うのかを解明することで、粒子加速、X線輻射、核融合などの機能を最大限に引き出すことができる。本研究では、プラズマの集団性の理解に必要なプラズマ粒子シミュレーションコードを国際共同研究で開発した。電磁波と粒子の相互作用だけでなく、粒子間の衝突過程やイオン化過程などの原子過程、さらには加速された荷電粒子からの輻射を組み込むことで、電磁波・家電粒子・光子の間の相互作用で起こる様々な現象の解明に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「強いレーザー光が物質をどのように加熱し、温度数千万度以上の高エネルギー密度状態のプラズマを形成するのか」という学術的な問いに答えるために、米国・ドイツ・フランスの研究者とともに、プラズマ粒子シミュレーションコードを国際共同開発した。開発したコードを活用し、最先端の強い光が作り出す非平衡プラズマの物性を研究し、レーザーイオン加速・高輝度ガンマ線輻射・電子陽電子対生成などの物理機構を解明した。さらに大学院生・若手研究者を育成し、コードの開発・運用を中心とした持続可能な国際ネットワーク環境を構築した。

研究成果の概要（英文）：Plasma is collective as a group of charged particles. Plasmas with high density and high energy produced by intense laser light are in non-equilibrium state. Understanding how individual particles respond to laser lights, which are electromagnetic waves, and how they behave collectively can maximize their functions such as particle acceleration, X-ray radiation, and nuclear fusion. In this study, a plasma particle simulation code necessary for understanding the collective nature of plasma was developed in international collaborations. By incorporating not only the interaction between electromagnetic waves and particles, but also atomic processes such as collision processes between particles and ionization processes, as well as radiation from accelerated charged particles, we have succeeded in clarifying various phenomena that occur in the interaction among electromagnetic waves, charged particles, and photons.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：高エネルギー密度科学 高強度レーザープラズマ相互作用 プラズマ粒子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

レーザー工学の発展によりレーザー出力がペタワット (10^{15} W)、集光強度が相対論的強度 ($>10^{20}$ W/cm²) を超える高強度レーザーの運用が始まっていた。このような“強い光”を物質に照射すると、温度 1 千万度以上、エネルギー密度 (圧力) が 1 ギガバールを超える高エネルギー密度状態のプラズマが形成される。発生するプラズマは、熱的非平衡状態にあり、相対論レーザープラズマ相互作用で生成する MeV~GeV 領域の相対論的高速電子がプラズマ内のエネルギー輸送に強く関与する。また様々な過程で大量の X 線やガンマ線が発生する。1 ギガバールというエネルギー密度は太陽の放射層からコア内部の状態と等しく、レーザー核融合の燃焼物理や恒星や巨大惑星の内部の物性研究の観点からも興味深い研究対象である。また高速電子輸送は数十キロテスラに達する強い磁場の発生を伴うので、強磁場下におけるプラズマ物性研究として近年注目されていた。また、コンパクトな高エネルギーイオンや高輝度ガンマ線などの新量子線源としての期待も高い。超高強度レーザーと物質の相互作用は、レーザーのパルス幅がフェムト秒からピコ秒 (10^{-15} ~ 10^{-12} 秒) で、スポット径がマイクロサイズであるため、極めて短時間に極小の空間で起こる。そのため実験では現象の直接観測が難しく、計測データのみでは物理現象の詳細を把握することができない。数値シミュレーションを援用した実験解析が不可欠である。超高強度レーザーで生成された高密度プラズマは、非平衡であるため運動論的な取り扱いが必要であり、Particle-in-Cell (PIC) と呼ばれるプラズマ電磁粒子コード (以下 PIC コード) が広く使われているが、原子過程、輻射過程、QED 過程などを自己無撞着に高精度に計算できる PIC コードに対する要望が高かった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、荷電粒子間衝突・電離過程などの原子過程や X 線・ガンマ線の輻射過程などを組み込んだ PIC コードである PICLS コードの開発を、米国・ドイツ・フランスの研究者との国際共同研究により加速することである。PICLS コードの物理モデルを拡張し、「強い光は物質をどのように加熱し、高エネルギー密度プラズマを形成するのか」という学術的問いに答えることで、高エネルギー密度科学の発展に寄与することを学術的目的としている。本研究は、レーザープラズマ相互作用、原子過程、輻射過程、QED 過程といった時定数の異なる多階層の物理過程を、複合的に且つ自己無撞着にシミュレーションすることを可能な世界唯一のコードを開発することに独自性があり、最先端のシミュレーションコードを活用し、今はまだ実現されていない未来のレーザー光による未踏の研究領域を開拓する。本研究で、ペタワットレーザーにより駆動されるプラズマの形成過程を解明し、高活性な非平衡プラズマを制御する方法を確立する。そして粒子加速や X 線輻射などのプラズマが内包する機能を効率的に引き出す指針を与える。また、最先端の研究に大学院生・若手研究者を参加させ、次世代の研究者として育成する。

3. 研究の方法

シミュレーションコードの開発とは、知的欲求により知りたいと思う現象の物理モデルを考え、それを数値的に解くため最適なアルゴリズムに落とし込み、プログラムをコーディングしていくことである。その後、基本的なデバッグが終われば、簡易状況での計算のテスト、実験データとの比較検証など行う。また、新しい物理モデルであれば、理論的にシミュレーション結果の妥当性を検証していくことが必要である。これら一連の作業は、理論の専門家や実験研究者との共同研究が必要である。そのために、米国 (カリフォルニア大学・サンディエゴ校、ローレンスリバモア国立研究所、ネバダ大学・リノ校)、フランス (ボルドー大学)、ドイツ (HZDR) の研究者と国際共同研究を展開する。

コード開発のベースは、これまで研究代表が中心になって開発を進めてきた PIC コード (PICLS) を用いる。3 年の研究期間に、高密度縮退プラズマの衝突モデル、重イオンプラズマの輻射モデル、電子・陽電子対生成過程を組み込み、実験との比較や理論との比較を通して、モデルの検証を行う。

4. 研究成果

以下に本研究の主な研究成果を紹介する。

- (1) 多変数スケーリングによる高強度レーザーイオン加速の最適化
(仏ボルドー大学との共同研究)

Y. Takagi, N. Iwata, E. d’Humieres, and Y. Sentoku, Phys. Rev. Res. **3**, 043140 (2021).

超高強度レーザーを薄膜ターゲットに照射することで、高エネルギーイオンが発生する。イオンのエネルギーを最大化する、あるいは発生するイオンへのエネルギー変換効率を最大化するなど、利用目的に応じてイオンビームを調整するには、レーザーとターゲットの条件を最適化する必要がある。最適な実験条件を見つけるために、これまでレーザー実験やプラズマ粒子シミュレーションを用いた研究が多く行われてきた。しかし、相対論的なレーザー・プラズマ相互作用は複雑であり、様々なパラメータが複合的に絡み合うためイオンエネルギーの予測スケーリングを得ることは容易ではない。我々は、ベイズ推論を用いた統計的アプローチにより、イオンエネルギーの多変量スケーリングを求めた。多変量解析では、何をパラメータとして採用するか、目的の現象を的確に捉えることが必要である。PICLS の解析の結果から同定したパラメータで得たイオンの最大エネルギーのスケーリングは以下の式で与えられることを示した。式中の各変数の冪指数はベイズ推定による大

$$E_{\max} \text{ (MeV)} = 27.1(I_{20}\lambda^2_{\mu\text{m}})^{0.61} \left(\frac{\tau_L}{10\text{fs}}\right)^{0.68} \times \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{Al}}}\frac{L}{1\mu\text{m}}\right)^{-0.43} \left(\frac{W}{10\mu\text{m}}\right)^{0.82}$$

量のデータ解析で求めている。図1は、レーザーエネルギーを10Jに固定した場合、最大のパフォーマンスを得るために必要なレーザーのパルス長と集光強度の分布である。今後の実験をデザインする上で指標となる結果である。

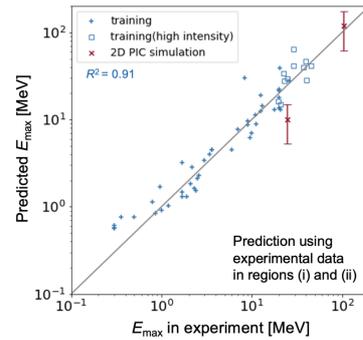


図1: レーザーイオン加速の実験データをベイズ推定で解析しスケーリング則を導いた。予測と実験データの比較結果。2次元PICLSシミュレーションとも良い一致を見た。

- (2) 大集光径ペタワットレーザーと薄膜相互作用における高速電子のスポット内閉じ込め効果とイオン加速へのインパクト

(米国ローレンスリバモア国立研究所との共同研究)

N. Iwata, A. J. Kemp, S. C. Wilks, K. Mima, D. Mariscal, T. Ma, and Y. Sentoku, Phys. Rev. Res. **3**, 023193 (2021)

高強度レーザー-プラズマ相互作用では、レーザースポット領域における高速電子の密度を最大化することが、プラズマ加熱と粒子加速を達成するための鍵となる。われわれは、レーザースポット径がターゲットフォイルの厚さに比べて大きい場合、薄膜内を周回する高速電子は、スポット領域内のプラズマ表面で揺らぐ磁場によって散乱され、横方向に「ランダムウォーク」することを発見した。この横方向の運動を拡散としてモデル化した結果、拡散速度は弾道的に輸送される速度よりもはるかに遅いことがわかった。したがって高速電子はスポット領域に蓄積し、時間とともにその密度はレーザーで加速された高速電子密度の10倍以上になる。ターゲット内の高速電子密度の増大は、固体の加熱やイオン加速をより効率的な領域へと押し上げることが期待される。これまで、レーザーエネルギーがキロジュール級の大口径ペタワットレーザーによるイオン加速で生成されるイオンのエネルギーが従来のフェムト秒の高強度レーザーよりも高効率になる理由が議論されていた。今回の我々の理論は、レーザー照射条件とターゲットパラメータから、高速電子が相互作用領域内にどの程度蓄積するか、また、高速電子のエネルギー分布がどのように時間発展し、高エネルギー化するかを明らかにするものである。レーザーイオン加速でのイオンビームを最適化する上で、非常に有益なものとなる。

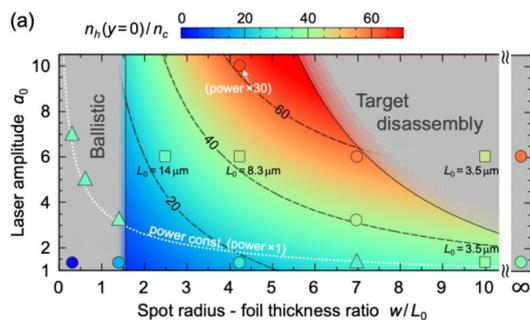


図2: レーザースポットサイズとターゲットの厚さの比とレーザー強度に対する高速電子の蓄積密度のマップ。

(3) 超相対論的高強度レーザーによるプラズマ中での光子衝突構造と陽電子加速構造の自己組織化

(米国カリフォルニア大学サンディエゴ校との共同研究)

K. Sugimoto, Y. He, N. Iwata, I-L. Yeh, K. Tangtartharakul, A. Arefiev, and Y. Sentoku, Phys. Rev. Lett. **131**, 065102 (2023).

本研究では、現時点で実験的に利用可能な最高強度のレーザーを用いることで、光子衝突による物質生成の検証実験が可能なることを理論的に始めて示した。ブライト・ウィラー過程と呼ばれる。2光子衝突による電子・陽電子対生成は1934年に理論が提唱されているが、未だ実験的に検証がなされていない。これは光子衝突の衝突断面積が 10^{-25}cm^2 と非常に小さいことに起因する。大量の高エネルギー光子を対向で衝突させる必要があるため実験的観測を難しくしていた。今回、QED過程であるガンマ線輻射過程と光子衝突過程をPICLSコードに組み込み、極端パルスペタワットレーザーとプラズマの相互作用中の電子・陽電子対生成を評価した。その結果、低密度プラズマに照射すると、臨界密度近傍でプラズマが自己組織化して光子衝突構造を発生し、2光子衝突による対生成が起こり、さらに発生した陽電子が、超相対論的エネルギーまで加速する機構を発見した。この機構の概念図を右図に示す。



図4：レーザー光とプラズマの自己組織化による電子・陽電子対生成機構の構造形成のイメージ。

臨界密度近傍を伝播するレーザー光は自己収束し、パルス導波路からプラズマを排除しチャンネルを形成する。チャンネル内では電子が強く前方へ加速されるため、チャンネルは強い磁場を伴う。磁場は加速された電子をシンクロトロン振動させ、前方方向へ高エネルギー光子線(ガンマ線)を輻射する。一方で、レーザーパルスは光子圧により、その先端に電子を積み上げ、電化分離による縦方向の静電場を励起する。この電場は、一部電子を引き戻し、引き戻された電子は、強いレーザー光と衝突し輻射減衰によりエネルギーを失いX線を放射する。ガンマ線とX線は対向配位で衝突し、電子・陽電子対生成を引き起こす。発生した陽電子は高エネルギーなガンマ線の運動量を引き継ぐため、前方にほぼ光速で移動し、パルス先端の静電場により持続的に加速を受ける。結果としてGeVエネルギーの陽電子ビームが前方へ強い指向性を持って放出される。予測される陽電子数は凡そ1,000,000個であり、他の電子・陽電子対生成(例えばベータ・ハイトラール過程)で発生する陽電子より数桁以上高い(図5参照)。レーザー光先端の静電場は、電子を減速するため、電子は陽電子よりエネルギーが低いことも特徴である。この研究成果は、線形ブライト・ウィラー過程の実験的検証や、陽電子ビームの応用への道を開くものである。

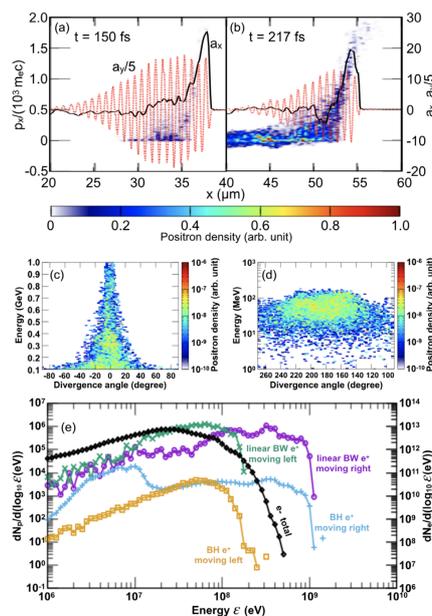


図5：線形ブライト・ウィラー(BW)過程で発生する陽電子の加速の様子(a)(b)。前方(c)と後方(d)に加速された陽電子の角度分布。発生した陽電子のエネルギースペクトル。レーザー照射方向前方と後方に分離してプロットしている。BHはベータ・ハイトラール過程によるもの。

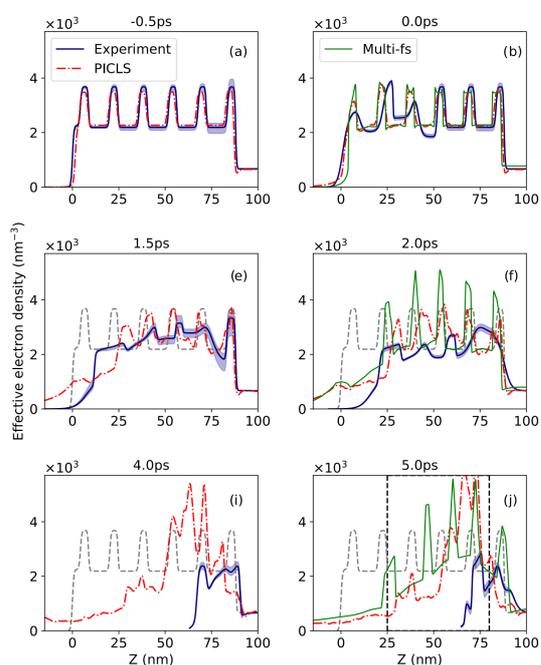
(4) 微小角入射X線散乱による高強度フェムト秒レーザー照射時のナノスケールでの固体表面下ダイナミクスの観察

(ドイツHZDRとの共同研究)

L. Randolph, M. Banjafar, T. R. Preston, et al., Physical Review Research **4**, 033038 (2022)

ナノスケール系における超高速レーザー誘起構造変化の観測は、強い光と物質の相互作用のダイナミクスを理解するために不可欠である。 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ オーダーのレーザー強度では、表面とその下に高度に衝突的なプラズマが発生する。その後の熱伝導、電子-イオン熱化、表面アブレーション、再凝固などの輸送過程がピコ秒からナノ秒の時間スケールで起こると予測される。XFEL計測により多層膜(ML)試料にレーザーを照射した時の、表面アブレーションとサブサーフェス密

度ダイナミクスを両方をナノメートルの分解能で測定した。実験データを、PICLS コードによるシミュレーション結果と比較検討した。PICLS コードの衝突モデルを、レーザー加熱された高密度縮退プラズマへ拡張し利用した。新たな物理モデルは、ピコ秒の時間スケールで良い一致をしており、レーザー材料加工の高精度化及び高エネルギー密度科学に新たな展望を開くものである。長時間の時間発展には再結合過程などの物理モデルの構築が必要であることも明らかになった。



図：XFEL によるレーザーで加熱された多層膜の電子密度の時間発展。左は実験と 1 次元 PICLS コードの比較結果。右は比較対象の流体コード Multi-fs の計算結果。PICLS コードの衝突モデルを縮退プラズマに拡張し計算結果は、実験結果と比較的良好一致をしている。4 ピコ秒での実験とのズレは再結合過程の影響と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Higashi Naoki, Iwata Natsumi, Sano Takayoshi, Mima Kunioki, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 105
2. 論文標題 Isochoric heating of solid-density plasmas beyond keV temperature by fast thermal diffusion with relativistic picosecond laser light	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 055202-1,7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.105.055202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Randolph L., (略), Nishiuchi M., Paulus M., Schon F.c, Sueda K., Sentoku Y., Togashi T.i, Busmann M., Cowan T. E., Klui Mathias, Fortmann-Grote C., Huang L., Mancuso A. P., Kluge T., Gutt C., Nakatsutsumi M.	4. 巻 4
2. 論文標題 Nanoscale subsurface dynamics of solids upon high-intensity femtosecond laser irradiation observed by grazing-incidence x-ray scattering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033038-1,11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.033038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sawada H., Yabuuchi T., Higashi N., Iwasaki T., Kawasaki K., Maeda Y., Izumi T., Nakagawa Y., Shigemori K., Sakawa Y., Curry C. B., Frost M., Iwata N., Ogitsu T., Sueda K., Togashi T., Glenzer S. H., Kemp A. J., Ping Y., Sentoku Y.	4. 巻 94
2. 論文標題 Ultrafast time-resolved 2D imaging of laser-driven fast electron transport in solid density matter using an x-ray free electron laser	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033511 ~ 033511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0130953	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iwata N., Kemp A. J., Wilks S. C., Mima K., Mariscal D., Ma T., Sentoku Y.	4. 巻 3
2. 論文標題 Lateral confinement of fast electrons and its impact on laser ion acceleration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023193-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevresearch.3.023193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takagi Yuji, Iwata Natsumi, d'Humieres Emmanuel, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 3
2. 論文標題 Multivariate scaling of maximum proton energy in intense laser driven ion acceleration	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043140-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevresearch.3.043140	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sugimoto K, Iwata N, Sunahara A, Sano T, Sentoku Y	4. 巻 64
2. 論文標題 Dynamics of ultrafast heated radiative plasmas driven by petawatt laser light	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 035004 ~ 035004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/ac4313	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishiuchi M., Dover N. P., Hata M., (略20名), Sentoku Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Dynamics of laser-driven heavy-ion acceleration clarified by ion charge states	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 033081,1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sano Takayoshi, Tatsumi Yusuke, Hata Masayasu, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 102
2. 論文標題 Plasma concept for generating circularly polarized electromagnetic waves with relativistic amplitude	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 053214,1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.053214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Higashi Naoki, Iwata Natsumi, Sano Takayoshi, Mima Kunioki, Sentoku Yasuhiko	4. 巻 37
2. 論文標題 Transition of dominant heating process from relativistic electron beam heating to thermal diffusion in an over picoseconds relativistic laser-solid interaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100829,1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100829	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto K., Higashi N., Iwata N., Sunahara A., Sano T., Sentoku Y.	4. 巻 36
2. 論文標題 PIC simulation for dense high Z plasma formation with ultrashort petawatt laser including radiation processes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics	6. 最初と最後の頁 100816,1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hedp.2020.100816	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 千徳靖彦
2. 発表標題 Electron energy distribution formation under recursive accelerations by relativistic laser light
3. 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩田夏弥
2. 発表標題 Lateral confinement of fast electrons and its impact on laser ion acceleration
3. 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木悠司
2. 発表標題 Multivariate scaling of maximum proton energy in intense laser driven ion acceleration
3. 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本馨
2. 発表標題 Electron-positron pair production by linear Breit-Wheeler process in ultra-short petawatt laser-plasma interaction
3. 学会等名 64th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千徳靖彦
2. 発表標題 輻射輸送とQED過程を考慮したプラズマ粒子シミュレーション
3. 学会等名 第27回数値トカマク実験(NEXT)研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千徳靖彦
2. 発表標題 高強度レーザー光による物質加熱過程の解明を目指したPICシミュレーション研究
3. 学会等名 STEシミュレーション研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千徳靖彦
2. 発表標題 Pathway to high gain laser fusion with fast ignition scheme
3. 学会等名 International Toki Conference 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本馨, 砂原淳, 岩田夏弥, 佐野孝好, 千徳靖彦
2. 発表標題 Dynamics of radiative plasmas driven by relativistic lasers
3. 学会等名 International Conference on Nuclear Photonics 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千徳靖彦
2. 発表標題 高強度レーザー駆動高密度プラズマ中の磁場形成と高速電子輸送
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千徳靖彦
2. 発表標題 強い光で切り開く高エネルギー密度科学の学術展開
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本 馨
2. 発表標題 高強度レーザーによる重金属プラズマ形成の多次元輻射粒子シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高木 悠司
2. 発表標題 統計的手法によるレーザーイオン加速のスケーリング則の導出
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千徳 靖彦
2. 発表標題 相対論的レーザーによる高エネルギー密度プラズマ形成における大集光径レーザーの優位性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本 馨
2. 発表標題 多次元輻射粒子シミュレーションによるレーザー駆動重金属プラズマ形成の理論解析
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千徳 靖彦
2. 発表標題 高強度レーザーによる高密度プラズマ加熱の理論研究
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本 馨
2. 発表標題 高強度レーザーによる重金属薄膜の等積加熱における硬X線輻射の影響
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木 悠司
2. 発表標題 重回帰分析による高強度レーザー駆動イオン加速の最大エネルギー予測式の導出
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千徳靖彦
2. 発表標題 NIF 実験の現状と当面の目標
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

PICLSコード共同開発プラットフォーム (GitHub)
<https://github.com/ysentoku/picls>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	城崎 知至 (Johazaki Tomoyuki) (10397680)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授 (15401)	
研究分担者	岩田 夏弥 (Iwata Natsumi) (70814086)	大阪大学・高等共創研究院・准教授 (14401)	
研究分担者	佐野 孝好 (Sano Takayoshi) (80362606)	大阪大学・レーザー科学研究所・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 日米ワークショップ"Theory and simulation on the high field and high energy density physics"	開催年 2023年~2023年
--	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

米国	University of California, San Diego	Lawrence Livermore National Laboratory	University of Nevada, Reno	
フランス	Universite de Bordeaux			
ドイツ	HZDR	European XFEL		
米国	University of California, San Diego	Lawrence Livermore National Laboratory	University of Nevada, Reno	他1機関
フランス	Universite de Bordeaux			
ドイツ	Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf e.V.			
米国	Lawrence Livermore National Laboratory	Purdue Univeristy	University of Nevada, Reno	
フランス	University of Bordeaux			
ドイツ	Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf e.V.			