

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01876

研究課題名(和文)2波長混合偏光交差レーザーによる高効率プラズマ加熱機構の解明

研究課題名(英文) Study on the mechanism of high efficient plasma heating by two-color mixed and cross polarization laser

研究代表者

有川 安信 (Arikawa, Yasunobu)

大阪大学・レーザー科学研究所・講師

研究者番号：90624255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：この研究課題では、大型超高強度レーザー(大阪大学のLFEXなど)では世界初となる手法でレーザーの波長変換を行い、基本波50%と2倍高調波50%を混合した世界でもユニークなレーザーを生成する。そのレーザーを核融合プラズマなど加熱対象ターゲットに照射することで、波長混合をしないレーザーに比べて3-5倍の高効率な加熱が実現するということを検証する研究である。従来よりも圧倒的に小さな非線形光学結晶(LBO結晶)を用いて、世界最大級パワーの波長混合レーザーを生成することに成功した。また2波長混合レーザーで、プラズマ加熱が向上することが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究によって、従来に比べて圧倒的にコンパクト(1/1000)サイズの非線形光学結晶で世界最大エネルギーの波長変換ができることが証明された。従来のレーザー波長変換の技術的困難を大幅に低減させることができた。これは阪大LFEXのような超大型レーザーのみならず、産業用を含むあらゆる高強度レーザーでもスケールして適応可能であり、今後多様なレーザー装置の波長変換にかかるコストが劇的に下がる事が期待される。またレーザーを2倍波と基本波の2波長を混合して偏光を交差させて照射することで、レーザーからプラズマへの光吸収割合が劇的に向上することも発見された。

研究成果の概要(英文)：This project is to aim to innovate a new scheme to generate novel laser pulse, second harmonics + fundamental mixed laser, at large energy ultra-intense laser (such as LFEX, Osaka University). The unique beam is injected to targets (for instance, nuclear fusion plasma) to heat up them, then we expect the heating efficiency is quite increased by 3-5 times compared to a single wavelength laser. We succeeded to generate the world largest energy second harmonics and combine second harmonics and fundamental laser. The laser is injected to the target and heating efficiency is increased. Our understanding of the heating mechanism physics in plasma heating by two wavelength mixed laser is deepen.

研究分野：超高強度レーザー

キーワード：波長変換 超高強度レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

超高強度レーザーによる電子・イオン加速は広範囲で研究がなされている。例えば高速点火レーザー核融合では核融合プラズマを加熱するために重要な研究課題である。限られたエネルギーのレーザーでいかに核融合プラズマを高効率に加熱するか、そのためにはいかに高効率に比較的低エネルギーの電子(およそ 1MeV 以下が効率的とされる)を発生させることができるか、というのが当該研究分野における大きな課題であった。ここで言う超高強度レーザーとは阪大の LFEX、米国の OMEGA-EP、NIF-ARC、フランスの LMJ-PETAL など、いずれも波長 1.05 $\mu\text{m}$ 、エネルギーは kJ 以上、パルス幅はピコ秒程度の大型の超高強度レーザーを指す。波長 1.05 $\mu\text{m}$  のレーザーで加熱を行うと加速される電子のエネルギーが 3MeV~10MeV に高エネルギー化してしまい、プラズマを貫通するようになってしまうため加熱効率が悪いというのが問題であった。高調波変換技術により波長 0.53 $\mu\text{m}$  に変換することで、加速される電子のエネルギーが半分になりプラズマ加熱効率が 2 倍程度に増大することは予測されてきた。しかしながら、レーザーの高調波変換の効率は、せいぜい 50%程度であることから、レーザーエネルギーを固定した時の加熱効率は得しないという問題を抱えていた。レーザーエネルギーの損失を伴わず波長を変換することができれば効率化が望める。

そこで我々は、LFEX をターゲットに集光しながら波長変換を行い、変換された波長 0.53 $\mu\text{m}$  と残留した波長 1.05 $\mu\text{m}$  を混合し、この波長変換方式の特徴により偏光が交差した 2 波混合レーザーを生成することを着眼した。これにより LFEX のエネルギーのほぼ全て(波長変換結晶の端面からのレーザー反射損失が存在する)をターゲットに照射することができる。また 2 波混合レーザーを用いると、加熱効率は 3-5 倍まで増倍させることができることが予測されていた。ここでは物理的にも新しいメカニズムが存在する。3 次元粒子シミュレーション(3D-PIC)計算によって、この 2 波混合レーザーをプラズマに入射させると、高効率に低エネルギー電子が発生することが見えたことがあった。しかしながら、3D-PIC シミュレーションは計算コストが高く、国立研究所のスーパーコンピューターを 2 週間使っても、実験の環境を 1/100 にスケールダウンした局所きな計算できず、パラメーター設定によっては上述のような加熱効率の向上効果が現れないこともあった。すなわち、加熱に関する物理的メカニズムが不明であるため、それを解明するべく、本研究を実施するに至った。この研究が実現すれば、超高強度レーザーによる電子・イオン加速において広く応用可能なプラズマ加熱に関する知見の創出という、画期的な研究成果を創出することができると期待されている。

## 2. 研究の目的

阪大 LFEX に波長変換装置を開発し、導入して、2 倍高調波と基本波を混合して偏光交差させた 2 波混合レーザーを発生させる。詳細な方法については後述するように、新しい波長変換方式を実現させる。その装置により生成された 2 波混合レーザーを用いてプラズマ加熱実験を行い、加熱効率の劇的な改善を図る。同時に、2 波混合レーザーによる電子加速に関して物理的な機構を明らかにする。これにより広く一般的に応用できる新しい高効率レーザー電子・イオン加速ならびに高効率プラズマ加熱手法の発明を図る。

## 3. 研究の方法

新しいコンパクト波長変換装置開発の方法：元来 LFEX のような超短パルス超高強度レーザーの波長変換は困難であり上述のいずれのレーザー施設でも波長変換は実現していない。一つ小さいサイズであるイギリスの ORION と呼ばれるレーザーにおいては波長変換装置が開発されている。本研究では申請者らが着眼した非線形光学結晶の一つである LBO 結晶(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)を用いる。従来の大型レーザー、ORION やその他ナノ秒パルス幅の大型レーザー施設の波長変換には KDP 結晶(KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)が用いられている。それは KDP 結晶が唯一大サイズの結晶育成が可能であるからである。しかしながら、KDP 結晶はレーザーによる損傷を受けやすい欠点があり、単位面積あたりに投入できるレーザーエネルギーに限界があった。また平行度の高いレーザー光に対してのみ波長変換をするという特性を持つため、集光途中のレーザーに対しては適応できない。集光の前段階である平行ビーム、ビーム直径 40cm の巨大な面をもつ結晶を作る必要がある。40cm 級のサイズの KDP 結晶は億円以上のコストがかかり、現実的ではなかった。LBO 結晶はダメージ耐性が KDP 結晶の 5 倍程度であり、集光中レーザーに対しても波長変換ができるという優れた特徴を持つ。かつては数 cm の結晶しか育成できなかったが、近年中国科学院の結晶育成研究所において 20cm 級の LBO 結晶が育成された。本研究では中国科学院と共同研究を行い、10cm×10cm×0.5mm の結晶を 4 枚入手し、実験を実施することができた。LFEX のレーザー光の集光途中でビームサイズが 7cm×7cm まで小さくなった位置で波長変換を行う。この超高強度は超変換という新しい方式を発明した。このレーザー強度において波長変換効率は飽和に達しており、むしろ結晶の厚さを 0.5mm 程度まで「薄くした方」が、波長変換効率が上がるという特徴も出現する。これによ

り従来波長変換装置に比べ、体積 1/100~1/1000 の小さな結晶で波長変換が実現できるようになった。これによりコストを大幅に抑え本研究事業の予算範囲内で波長変換を実現することができた

高効率加熱の検証の方法：2波混合レーザーが実現すれば、そのレーザー光をターゲットに集光し、同等条件で波長混合なしのレーザーと加熱量を比較する。ここでは核融合プラズマに限らず、よりシンプルな金属平板の加熱実験から開始する。

2波混合レーザーによる電子加速と加熱メカニズムの研究手法：2波混合レーザーは合成すると8の字偏光をした特殊な光になっている。また1+1/2波長混合レーザーをプラズマに照射すると絶対共鳴条件（一般的に知られる自然発生的誘導ラマン散乱よりも共鳴的に起こる）での誘導ラマン散乱が起こることが知られている。この反応によりレーザー光が共鳴的にプラズマ波にエネルギーが受け渡され、100keV程度の電子を大量に加速することが予測されている。まず理論解析的手法によりこの作用が期待できるか検討する。さらに大型スーパーコンピュータを用いて3D-PICシミュレーションを使って必要サイズを計算し、電子加速の振る舞いを調べるといものである。これには研究チーム一丸となった協力が必要である。

#### 4. 研究成果

波長変換の開発の成果：波長変換装置およびLBO結晶の調達、研磨、ダメージの問題を克服しながら、3年間の研究により最終的に、LFEXレーザーで最大320J、パルス幅1.5psの条件、最大50%の波長変換が実現した。この成果を得るまでの3年間の間に、実験中に予想に反して低いレーザーエネルギーでLBO結晶にレーザー損傷が入ることが相次ぎ、原因を特定しつつ、それらを克服してきたが、限られた予算と時間内に実現できる最善の設計としてLFEXの最大エネルギーの1/2程度で制限をかけ、LBO結晶に損傷が入らないように工面して実験した。将来的にはLBO結晶の面積を2倍にすることでフルエネルギーでの運用ができることは確かめられた。図1に波長変換実験で得られた実験結果を示す。横軸に入射したLFEXのエネルギー（LBO結晶に投入されたエネルギー）縦軸に発生した2倍高調波のエネルギーをプロットしている。黒線は理論上の最大変換率の曲線を示しており、青線は目標とする50%の波長変換率を示している。グラフ中の画像は2倍高調波のビームパターンであり、ビームの強さをカラーマップで示してある。200Jのデータは比較的平坦なビーム強度分布（中心部と周辺部で色調が近い、十字模様の黒い部分はもともとのLFEXのビームパターンに由来する。）

が得られているが320Jのショットで中心部が欠けていることがわかる。これはレーザー強度が高すぎることから非線形光学作用により波長変換効率が劣化していることを示す。この問題に関して、300J以上のショットを行う場合は、LBO結晶の設置角度を現在から1°シフトさせることで克服可能であることがわかっている。この成果は、従来は困難であった超高強度レーザーの波長変換を、しかも圧倒的にコンパクトな非線形光学結晶によって波長変換できる手法を確立したものである。

このレーザーを銅の小さな板に照射し、電子の発生数や加熱の効果を比較した。レーザーエネルギーをほぼ同じに設定し、LBO結晶を用いた場合と用いなかった場合で比較を行なった。結果は、波長変換あり・なしでほぼ同じ加熱量が検出された。しかしながら、加熱量の向上については現段階では結論はできていない。今回の実験で用いたLBO結晶には若干のたわみが残っており、このLBOによって波長変換をしたことによりレーザーのスポットサイズがもともとのLFEXより大きくなってしまい、波長変換あり・なしで同じレーザー強度の固定ができなかったからである。レーザーエネルギーのみならずレーザー強度によっても加熱量が変化するためである。現在もLBO結晶のたわみを取り除く研究を続けており、2022年9月に再度実験が行われる計画である。

加熱メカニズムの理論的説明について、絶対共鳴条件の誘導ラマン散乱についての理論解析が進んだ。プラズマの条件を考慮に入れ、解析を行なった結果、2波長は完全に1:1/2の波長ではなく数nmの波長差を持っていることで共鳴条件が成立することがわかった。LFEXはチャープパルスと呼ばれる波長幅8nmを持つレーザーであるため、この条件は合致することが明らかとなった。これにより本方式は理論的にも成り立つことが証明された。次回実験では画期的な実験結果が期待される。

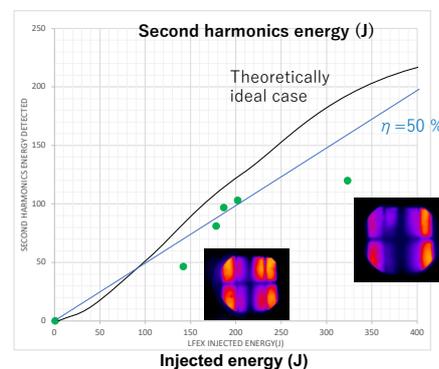


図1 実験で得られた波長変換率。横軸に入射したLFEXのエネルギー（LBO結晶に投入されたエネルギー）縦軸に発生した2倍高調波のエネルギーをプロットしている。黒線は理論上の最大変換率の曲線、青線は50%の波長変換率。グラフ中の画像は2倍高調波のビームパターン。

創出された研究成果（すべてにおいて謝辞記載あり）

#### 論文

[1] M. Hata, Y. Arikawa, H. Nagatomo, Y. Sentoku, “Effects of mixed laser beam irradiation with different wavelengths on fast electron generation”, High Energy Density Physics, **38**, 100918, (2021).

#### 国際学会招待講演

[1] “Second Harmonics Generation on LFEX”

Y. Arikawa, Z. Hu, Y. Zhao, H. Tu, F. Fan, S. Kojima, M. Hata, Y. Sentoku, T. Johzaki, H. Sakagami, S. Sakata, Y. Abe, S. H Lee, K. F. F. Law, H. Kishimoto, H. Morita, Y. Kanbayashi, M. Alessio, S. Tokita, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Yoshimura, A. Yogo, H. Nishimura, H. Azechi, H. Shiraga, M. Nakai, S. Fujioka, R. Kodama, 11 th Inertial Fusion Science and Applications (IFSA 2019), Osaka, 2019. 9. 25.

#### 国内学会

[1] 有川安信, 須多敏貴, 浅野 将唯, Morace Alessio, 椿本孝治, 中田芳樹, 藤岡慎介, 中井光男, LFEX-group, 白神宏之, 兒玉了祐、高エネルギー超高強度レーザーLFEX の波長変換実験の進展、第42回レーザー学会2022年次大会、(オンライン開催)、2022年1月14日、

[2] 須多敏貴, 有川安信, 浅野 将唯, Morace Alessio, 椿本孝治, 中田芳樹, 藤岡慎介, 中井光男, 白神宏之, 兒玉了祐、高エネルギー超高強度レーザーLFEX の波長変換計測手法の開発、第42回レーザー学会2022年次大会、(オンライン開催)、2022年1月14日、

[3] 有川安信, 椿本孝治, 南上和也, 中尾采美, 浅野将唯, Morace Alessio, 瀧澤龍之介, 嶽村真緒, 安部勇輝, 森田大樹, 河仲準二, 藤岡慎介, 中井光男, 白神宏之, LFEX-group, 兒玉了祐, Hu Zhanggui、LFEX レーザーの2倍高調波発生装置の開発、第41回レーザー学会2021年次大会、(オンライン開催)、2021年1月18日、

[4] 有川安信, Hu Zhanggui, 畑昌育, 椿本孝治, 南上和也, Morace Alessio, 瀧澤龍之介, 嶽村真緒, 安部勇輝, 松尾一樹, 南卓海, 大熊祐輝, 牧山大暉, 延命佑哉, 中尾采美, 浅野将唯, King Fai Farley Law, 森田大樹, 小島完興, 千徳靖彦, 蔵満康浩, 羽原英明, 時田茂樹, 河仲準二, 宮永憲明, 實野孝久, 中田芳樹, 余語覚文, 藤岡慎介, 疇地宏, 中井光男, 白神宏之, LFEX-group, 城崎知至, 坂上仁志, 尾崎哲, 兒玉了祐、LFEX の基本波-二倍高調波混合ビーム用いた電子発生、第40回レーザー学会2020年次大会、(仙台国際センター)、2021年1月18日、

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Hata, Y. Arikawa, H. Nagatomo, Y. Sentoku,	4. 巻 38
2. 論文標題 Effects of mixed laser beam irradiation with different wavelengths on fast electron generation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 High Energy Density Physics, 38, 100918, (2021)	6. 最初と最後の頁 100918-100922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 A. Morace, Y. Abe, J. J. Honrubia, N. Iwata, Y. Arikawa, Y. Nakata, T. Johzaki, A. Yogo, Y. Sentoku, K. Mima, T. Ma, D. Mariscal, H. Sakagami, T. Norimatsu, K. Tsubakimoto, J. Kawanaka, S. Tokita, N. Miyanaga, H. Shiraga, Y. Sakawa, M. Nakai, H. Azechi, S. Fujioka, R. Kodama	4. 巻 12
2. 論文標題 Super strong magnetic field & dominated ion beam dynamics in focusing plasma devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6876-6880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 有川安信, 橋本孝治, 南上和也, 中尾 采美, 浅野 将唯, Morace Alessio, 瀧澤龍之介, 嶽村真緒, 安部勇輝, 森田大樹, 河仲準二, 藤岡慎介, 中井光男, 白神宏之, LFEX-group, 兒玉了祐, AHu Zhanggui,
2. 発表標題 LFEXレーザーの2倍高調波発生装置の開発
3. 学会等名 第41回レーザー学会2021年次大会、（オンライン開催）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Arikawa, Z. Hu, Y. Zhao, H. Tu, F. Fan, S. Kojima, M. Hata, et al.,
2. 発表標題 Second harmonics generation on LFEX
3. 学会等名 11 th Inertial Fusion Science and Applications (IFSA 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有川安信, Hu Zhanggui, 畑昌育, 椿本孝治, 南上和也, Morace Alessio, et. al.,
2. 発表標題 LFEXの基本波-二倍高調波混合ビーム用いた電子発生
3. 学会等名 第40回レーザー学会2020年次大会、(仙台国際センター)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有川安信, 須多敏貴, 浅野 将唯, Morace Alessio, 椿本孝治, 中田芳樹, 藤岡慎介, 中井光男, LFEX-group, 白神宏之, 兒玉了祐,
2. 発表標題 高エネルギー超高強度レーザーLFEX の波長変換実験の進展
3. 学会等名 第42回レーザー学会2022年次大会、(オンライン開催)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 須多敏貴, 有川安信, 浅野 将唯, Morace Alessio, 椿本孝治, 中田芳樹, 藤岡慎介, 中井光男, 白神宏之, 兒玉了祐
2. 発表標題 高エネルギー超高強度レーザーLFEXの波長変換計測手法の開発
3. 学会等名 第42回レーザー学会2022年次大会、(オンライン開催)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 小型超高時間分解能 光・量子パルス測定装置	発明者 有川安信, 太田雅人, 他	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020- 94980	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 燃料ペレット、燃料ペレットの製造方法、核融合炉、及び核融合方法	発明者 藤岡慎介、長友英 夫、千徳靖彦、有川 安信、他	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-202969	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 中性子発生方法および中性子発生装置	発明者 有川安信、佐藤透 北川勝浩 香川晃徳 根来誠 余語覚文	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021- 31081	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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	時田 茂樹 (Tokita Shigerki) (20456825)	京都大学・レーザー科学研究所・教授  (14301)	
研究分担者	畑 昌育 (Hata Masayasu) (60712429)	量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所・研究員  (82502)	
研究分担者	安部 勇輝 (Abe Yuki) (70817543)	大阪大学・工学研究科・助教  (14401)	
研究分担者	椿本 孝治 (Tsubakimoto Koji) (90270579)	大阪大学・レーザー科学研究所・助教  (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0件

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
---------	---------