

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510120

研究課題名(和文)低線量放射線の最初期過程観測を目指した光結晶加速器の設計基盤の確立

研究課題名(英文) Design study of a photonic crystal particle accelerator for observing initial processes of an ionization radiation in a biological cell

研究代表者

小山 和義 (Koyama, Kazuyoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・先端加速器推進部・特定教授

研究者番号：40357041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：光結晶加速器は生体細胞中での放射線影響の解明の道具に向いている。必要な電子バンチのエネルギーは約1MeVで電荷量は約0.01fCである。シミュレーションで、20keVの電子に対する加速勾配は48MeV/mが可能であり相対論的電子に対しては600MeV/mであることを明らかにした。1MeVのエネルギーを得るためには加速器の長さが4mm。必要なレーザーパワーとエネルギーは夫々200MWと10mJである。レーザーパルスをN個の対に分割して掃引照射してパワー、パルスエネルギーを軽減できる。例えばN=10のときに必要なレーザーパワーはパルス当たり20MWである。

研究成果の概要(英文)：A transmission grating type laser-driven dielectric accelerator (TG-LDA) is a suitable tool for observing fundamental processes of the radiation effects in a living cell. The required electron energy and electronic charge of the bunch are about 1 MeV and 0.01 fC, respectively. The simulation results by using the FDTD code, Meep, showed that acceleration gradients of 48 MeV/m and 600 MeV/m for the low energy electron of 20 keV and the relativistic electron, respectively. An accelerator length to get the energy gain of 1 MeV is 4 mm. The required laser power and energy are 200 MW and 10 mJ, respectively. A restriction on the laser is relaxed by adopting multiple pulses. If the accelerator is illuminated by N-pairs of sequential pulses, the pulse power, pulse width and the pulse energy are reduced to 1/N, 1/N and 1/N², respectively. The required laser power per pulse is estimated to be 20MW when N=10 of sequential laser pulse is adopted.

研究分野：ビーム物理

キーワード：誘電体加速器 放射線生物学 マイクロビーム 電子ビーム

1. 研究開始当初の背景

生体に対する低線量時の放射線効果や放射線治療の二次的な発ガンリスク評価のためには、放射線を直接受けていない細胞にも影響が現れる現象(バイスタンダー効果)についての理解が必須である。この現象は、細胞生物学の研究者の関心も集めている。この現象の解明のためには、放射線による細胞内分子の電離や電離後のイオン内の電子、低エネルギーの二次電子の移動といった、フェムト秒からアト秒の領域で起こる素過程の理解が不可欠である。現在は、二次電子を模擬して照射した気相中での実験結果から推定している。しかし、実際の生体内細胞は気相中には無く環境が異なる。低線量下でのDNA損傷・修復機構の解明のためには、生きた細胞の一部を狙い撃ちできる超短パルス・マイクロビームが必要である。この研究に必要な電子のエネルギーと電荷量は夫々500keV~1MeVと0.01fC~0.1fCである。細胞内の一部を狙った照射は放射光や電子顕微鏡でも可能である。しかし、前者は設備には放射線遮へいが必要であり装置が大掛かりである。後者は高真空が必要である。その上これらは、単発現象に対しては、フェムト秒からアト秒の時間分解能を得ることが難しいといった問題がある。

一方、光結晶加速器は、レーザーも含めて小型化が可能であり配置の自由度が大きく、1MeV級のビームをアト秒の時間でミクロンの空間に局在させる能力を持つ。光結晶加速器は製作の難しさはあるが、レーザープラズマ航跡場加速器と異なり、固体によって境界が固定されているので加速電界の制御は容易であり安定性に優れていると考えられる。また、レーザープラズマ航跡場加速器に比べてレーザーパルスのパワーは千分の一以下で良いなど、優れた点が多い。

2. 研究の目的

低線量放射線の生体に対するリスク評価に当っては、放射線による細胞内分子の電離や電離後のイオンの拡散、イオン内の電子配位、低エネルギーの二次電子の移動といった素過程の理解が必須である。そのためには、1MeV程度の高エネルギービームをアト秒、ミクロンに局在させる能力を持つ光結晶レーザー加速器と、その出力に同期した超短パルスプローブ光が有用である。本課題では、光結晶加速器のシミュレーションを行い、計測システムの実証器の最適構造を決定し、光結晶加速器の設計の基礎を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 光結晶中のレーザー光の伝播は特殊な場合以外は解析解がないので、シミュレーションコードによって光結晶と励起用レーザーの仕様を明らかにする。具体的には、シミュレーションによって加速管中での電子ビーム軌道近傍のレーザー電界強度分布を求

めて加速のスケージング則を明らかにする。製作が比較的容易である一次元加速構造(透過型回折格子)に関する解析を行う。これ以降、光結晶加速器を「一次元誘電体加速器」と称することとする。一次元誘電体加速器の形状例を図1に示す。レーザー電界の強度分布の計算にはFDTD(Finite Difference Time Domain method)シミュレーションコードを使用する。この計算コードは荷電粒子の運動を計算できないので、加速電界を知るにはまず、一次元誘電体加速器の中心軸上における電界分布の時間変化を求める。中心軸に沿った座標と時間が作る空間内での電子の軌道(世界線)に沿った積分が加速電界に相当する。このような手法を用いて、一次元誘電体加速器を構成する回折格子の格子定数、格子の高さ等の最適条件を求める。

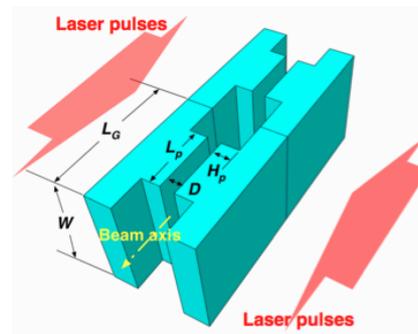


図1 一次元誘電体加速器の2ユニット

(2) レーザーの仕様は、光結晶のレーザーによる破壊の閾値または非線形光学効果の閾値と、加速電界、加速に要する長さ、加速に要する時間を考慮して決める。

光結晶破壊の閾値は実験データが少なく加工精度によっても変化するのでKEKに移設したレーザーを用いて計測する。また、そのために用いる透過型回折格子を試作する。回折格子の試作はリソグラフィ技術を用いる。

(3) レーザー光の導入光学系および電子源に関しては、一つの方式に絞らず幅広く調査を行い、全システムとの整合の視点から比較検討し、次期に計画の実証実験に備える。

4. 研究成果

(1) 一次元誘電体加速器で加速電界を発生するためには、透過型回折格子の格子部分と真空部分との屈折率の違いによる位相速度の差を利用して光の位相に次第にズレを生じさせる。格子を出たときに位相差が π (半波長)になるようにする。レーザーの偏光方向と電子の進行方向を同じくして、電子の進行に同期して電子が常に同じ方向の電界を受けるように格子定数と格子の高さを選ぶと、電子は次々と電界の加速位相に入るので連続的に加速される。上記の原理は数式を使って以下のように表される。レーザー波長を λ 、誘電体の屈折率を n 、回折格子の格子定数を

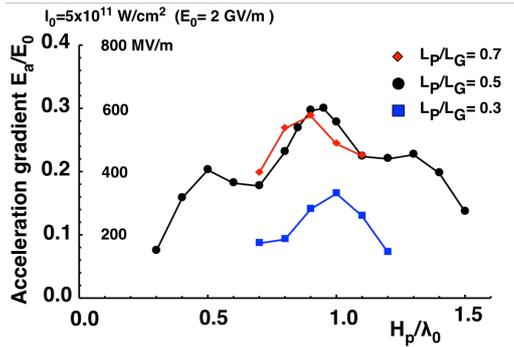


図2 加速勾配の格子高さ依存性

L_G 、格子の高さを H_p および幅を L_p 、格子対の間隔を D 、電子の速度を v として以下の関係式、 $L_G/\lambda = v/c$, $L_p = L_G/2$, $H_p/\lambda = 1/2(n-1)$, $D/\lambda < (L_p/\lambda)^2$ を得る。ここで c は真空中の光速であり、最後の式は近接場の影響が及ぶ範囲を表す。すなわち、最適値は L_G と H_p に対してはレーザーの波長程度の大きさであり、 D はレーザー波長の約 $1/4$ であることがわかる。

実際には格子中を光が伝播するとき境界の影響を受けて波面が歪むために、上記の条件とは若干異なるはずである。また工作精度の許容度を知るためにも、数値計算による解析が必要である。FDTD コード(Meep) によって得た加速勾配の格子高さ依存性と電子のエネルギー（速度の自乗）に対する依存性を、それぞれ図2と図3に示す。

加速勾配は、格子の幅 L_p が格子定数 L_G の入射光の半分かつ格子の高さ H_p がレーザー波長の90%の時に最大（入射光の電界強度の30%）になる。

前述の関係式によると電子の速度が遅い場合には格子定数を波長よりも短くする必要があるが、格子定数を波長の80%にただで加速電界が10%以下に低下することが分かった。格子定数を波長に等しく保ったままで低速電子に対する加速勾配を求めた結果が図3であり、速度が低下して整合条件から外れると急速に加速電界が下がる。さらに下がって100keV以下になると周期的に電界が変化している。これは電界分布の空間高調

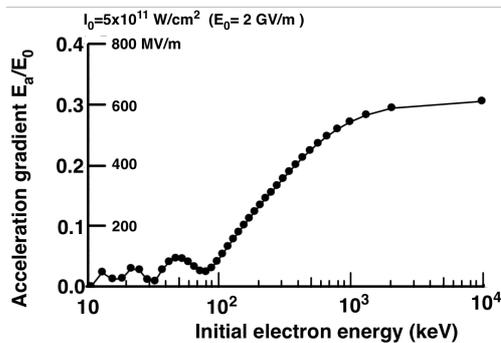


図3 加速勾配の電子エネルギー依存性

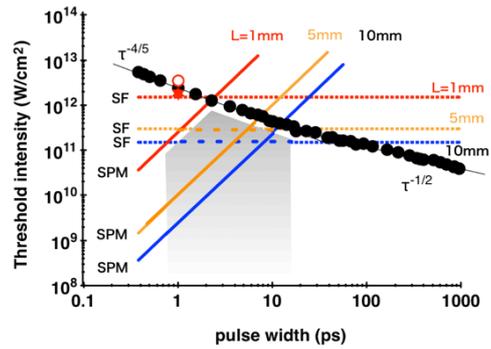


図4 光学損傷と非線形光学効果の閾値

波成分によるものである。このことから一定の格子定数でも電子を20keV程度の低エネルギーから加速可能であると結論できる。

(2) 加速電界強度は回折格子の光学損傷と非線形光学効果の閾値で決まる照射可能なレーザー強度によって制限される。非線形光学効果（自己集束効果と自己位相変調効果）および光学破壊の閾値を図4にまとめて示す。照射可能な強度はパルス幅が1ps以下のレーザーパルスに対しては自己位相変調効果で制限される。100ps以上のパルスの照射可能な強度は光学破壊で制約される。照射強度を 10^{12}W/cm^2 にするためには、パルス幅を2psにして光路長を1mm以下にする必要がある。パルス幅が1psから10psの間で、光路長を1mm程度とするとレーザー照射強度（レーザー電界）は $5 \times 10^{11} \text{W/cm}^2$ (2GV/m) が適当であると言える。図2と図3の中の縦軸の電界強度を求めるに当たっては、この値を用いた。レーザーパルス加速長と加速時間の全体にわたって照射するのではなく、照射を N 対のレーザーパルスで順次照射するとレーザーパルスのパワー、パルス幅、エネルギーはそれぞれ $1/N$, $1/N$, $1/N^2$ に軽減でき、 $N=20$ の場合には20MW、5psのパルスを次々に照射すれば良いことになる。それぞれのレーザーパルスの振動電界は互いに位相整合させる必要がある。ファイバーレーザーはファイバーに組み込んだ素子を用いて位相制御と偏光制御が可能であり、誘電体加速

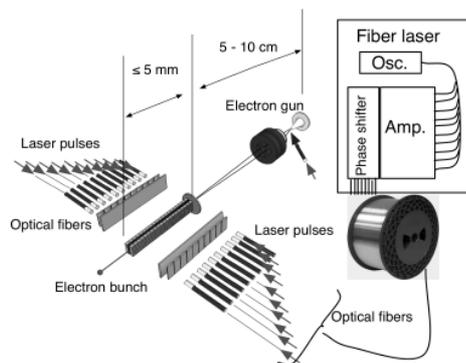


図5 一次元誘電体加速器の概念図

器にとって最適なレーザーであると言える。ここで明らかになったレーザーのパラメータは高繰り返し可能なレーザーの性能の範囲内にあり、近い将来に実現できる可能性が高い。将来はオンチップ加速器に更にはオンチップ放射光源として発展できる可能性がある。

上記の加速電界を用いて 1MeV のエネルギーの電子を得るための一次元誘電体加速器の大きさを見積もると、加速管の長さと同幅がそれぞれ 4mm と 5 μ m で片側の照射面積が 0.02mm²、加速に要する時間が 50ps になる。全照射面積を全加速時間にわたってレーザー照射するとパワーが 200MW でパルス幅が 50ps のレーザーが必要である。レーザーに対する要請を緩和するために、例えば $N=10$ 対に分割すると 20MW、5ps のパルスを次々に照射すれば良いことになる。分割によって必要なレーザーのパルス当たりのエネルギーは 5mJ から 50 μ J に全エネルギーは 10mJ から 1mJ に軽減できる。

(3) レーザーの導入は図 5 のように二種類の円筒レンズを用いる方法が考えられるが、数 mm の中に独立した 10 本以上のレーザービームを平行に導入することは難しい。調査の結果、光結晶を使った光学素子を使うことによって扱いやすさと耐久性なども向上できる可能性があることが分かった。

電子源は、当面の実験には熱陰極電子銃と四重極電磁石を使う予定であるが、オンチップ化のために、強誘電体などを使った全固体型電子銃の可能性を調査した。安定性に問題があるもののレーザーと組み合わせることによって安定化できる可能性があることが分かった。

これらの二項目の具体化は、次期の計画に組みこむ予定である。

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 K. Koyama, S. Otsuki, M. Uesaka, M. Yoshida, A. Aimidula, "Parameter study of a laser-driven dielectric accelerator for radiobiology research", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys, 査読有, Vol. 47, 2014, 234005-1-8. doi:10.1088/0953-4075/47/23/234005

② K. Koyama, M. Yoshida, Y. Matsumura, S. Otsuki, M. Uesaka, "DESIGN STUDY OF THE LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR", Proceedings of IPAC14, 査読無, Vol.1, 2014, 1428-1430.

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/tupme035.pdf>

③ S. Otsuki, K. Koyama, M. Yoshida, Y. Matsumura, S. Mima, M. Uesaka, "DEVELOPMENT ON ON-CHIP RADIATION

SOURCE USING DIELECTRIC LASER ACCELERATOR", Proceedings of IPAC14, 査読無, Vol.1, 2014, 1434-1436.

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/thoba4.pdf>

④ A. Aimidula, M. A. Bake,,F. Wan,,B. S. Xie,,C. P. Welsch,,G. Xia,,O. Mete, M. Uesaka,,Y. Matsumura, M. Yoshida, K. Koyama, "Numerically optimized structures for dielectric asymmetric dual-grating laser accelerators", Phys. Plasmas, 査読有, Vol.21, 2014, 023110-1-5. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4866020>

⑤ A. Aimidula, C.P. Welsch, G. Xia, K. Koyama, M. Uesaka, M. Yoshida, O. Mete, Y. Matsumura, "Numerical investigations into fiber laser based dielectric reverse dual-grating accelerator", Nucl. Instrum Methods Phys Res A. 査読有, Vol.740, 2013, 108-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.10.083>

⑥ Y. Matsumura, K. Koyama, M. Uesaka, M. Yoshida, X. Zhou, "Development of Yb Laser For High Power Ultra-Short Pulse", Proceedings of PAC2013, 査読無, 2013, 1094-1096. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2013/papers/thoba4.pdf>

⑦ A. Aimidula, C.P. Welsch, K. Koyama, Y. Matsumura, T. Natsui, M. Yoshida, M. Uesaka, G.X. Xia, "Design of a Photonic Crystal Accelerator for Basic Radiation Biology", Proceedings of IPAC2013, 査読無, 2013, 1283-1285. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/tupea065.pdf>

⑧ K. Koyama, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, and A. Aimidula, "Laser-driven dielectric electron accelerator for radiobiology researches", Proc. SPIE, 査読無, Vol. 8779,, 2013 , 877910-1-6. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2017221>

K. Koyama, A. Aimidula, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, "DESIGNING OF A PHASE-MASK-TYPE LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR FOR RADIOBIOLOGY", Proc. of 26th LINAC12, 査読無, 2012, 1041-1043. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2012/papers/thpb095.pdf>

⑩ K. Koyama, A. Aimidula, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, "DESIGNING OF PHOTONIC CRYSTAL ACCELERATOR FOR RADIATION BIOLOGY", Proc. of IPAC12, 査読無, 2012, 2763-2765. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/weppp019.pdf>

⑨ M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, "DESIGNING OF A PHASE-MASK-TYPE LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR FOR RADIOBIOLOGY", Proc. of 26th LINAC12, 査読無, 2012, 1041-1043. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/LINAC2012/papers/thpb095.pdf>

⑩ K. Koyama, A. Aimidula, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, "DESIGNING OF PHOTONIC CRYSTAL ACCELERATOR FOR RADIATION BIOLOGY", Proc. of IPAC12, 査読無, 2012, 2763-2765. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/weppp019.pdf>

⑩ K. Koyama, A. Aimidula, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, "DESIGNING OF PHOTONIC CRYSTAL ACCELERATOR FOR RADIATION BIOLOGY", Proc. of IPAC12, 査読無, 2012, 2763-2765. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/weppp019.pdf>

[学会発表] (計 21 件)

① 小山和義, "放射線生物学研究への応用を目指したマイクロビーム", ビーム物理研究会 2014, 2014/11/25-11/26, みやつ歴史の館

(宮津市)。

- ② 大槻祥平, 吉田光宏, 小山和義, 美馬寛, 上坂充, “放射線生物応用のためのレーザー誘電体加速によるオンチップ MeV 電子加速器開発”, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014/8/9-8/11, リンクステーションホール青森 (青森市)。
- ③ 小山和義, 大槻祥平, 上坂充, 吉田光宏, “非線形光学効果を考慮したレーザー 駆動誘電体加速のパラメータ”, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014/8/9-8/11, リンクステーションホール青森 (青森市)。
- ④ K. Koyama, M. Yoshida, Y. Matsumura, S. Otsuki, M. Uesaka, ”DESIGN STUDY OF THE LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR”, IPAC14, 2014/6/15-6/20, Dresden (Germany).
- ⑤ S. Otsuki, K. Koyama, M. Yoshida, Y. Matsumura, S. Mima, M. Uesaka, “DEVELOPMENT ON ON-CHIP RADIATION SOURCE USING DIELECTRIC LASERACCELERATOR”, IPAC14, 2014/6/15-6/20, Dresden (Germany).
- ⑥ K. Koyama, M. Yoshida, M. Nozaki, Y. Matsumura, S. Otsuki, M. Uesaka, R. Kuroda, A. Yamazaki, “Research on High-gradient Acceleration at KEK”, HEDS2014, 2014/4/22-4/25, パシフィコ横浜 (横浜市)。
- ⑦ 小山和義, 大槻祥平, 松村陽介, 上坂充, 吉田光宏, “放射線生物学応用を目指したレーザー励起誘電体粒子加速”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2014/3/27-3/30, 東海大学 (平塚市)。
- ⑧ K. Koyama, M. Yoshida, M. Nozaki, Y. Matsumura, S. Otsuki, M. Uesaka, “Research on Novel Acceleration Technology at KEK”, 5th AFAD, 2014/1/14-1/16, Melbourne (Australia).
- ⑨ 小山和義, 松村陽介, 上坂充, 吉田光宏, 夏井拓也, アイミアディング・アイミドラ, “レーザー駆動誘電体加速器の設計”, 第 10 回日本加速器学会年会, 2013/8/3-8/5, 名古屋大学 (名古屋市)。
- ⑩ A. Aimidula, C.P. Welsch, G. Xia, K. Koyama, Y. Matsumura, M. Uesaka, T. Natsui, M. Yoshida, “Fibre Laser Based Dielectric Gratings Accelerator”, EAAC2013, 2013/7/2-7/7, Isola d'Elba (Italy).
- ⑪ K. Koyama, M. Yoshita, K. Nakajima, M. Nozaki, “Exotic Accelerator Researches at KEK”, 3rd-IZEST, 2013/7/17-7/18, Livermore, CA (USA).
- ⑫ K. Koyama, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, A. Aimidula, and C. P. Welsch, “Laser-driven Dielectric Electron Accelerator for Radiobiology -Optimization of electron source and dimensions-”, LANE13, 2013/4/23-4/25, パシフィコ横浜 (横浜市)。
- ⑬ Y. Matsumura, K. Koyama, M. Uesaka, M. Yoshida, X. Zhou, “Development of Yb Laser For High Power Ultra-Short Pulse”,

NA-PAC2013, 2013/9/29-10/4, Pasadena, CA. (USA).

- ⑭ A. Aimidula, C.P. Welsch, K. Koyama, Y. Matsumura, T. Natsui, M. Yoshida, M. Uesaka, G.X. Xia, “Design of a Photonic Crystal Accelerator for Basic Radiation Biology”, IPAC2013, 2013/5/12 -5/17, Shanghai (China).
- ⑮ A. Aimidula, C.P. Welsch, K. Koyama, Y. Matsumura, M. Uesaka, T. Natsui, M. Yoshida, “Design of Laser Driven Dielectric Accelerator for Basic Radiation Biology Researches”, 1st LA3NET School; Laser Applications at Accelerators, 2012/10/14-10/19, CERN (Switzerland).
- ⑯ K. Koyama, A. Aimidula, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, “DESIGNING OF A PHASE-MASK-TYPE LASER DRIVEN DIELECTRIC ACCELERATOR FOR RADIOBIOLOGY”, LINAC12, 2012/9/10-9/14 Tel Aviv (Israel).
- ⑰ 小山和義, A. Aimidula, 上坂充, 松村陽介, 吉田光宏, 夏井卓也, “レーザー駆動誘電体加速器 放射線生物学研究への応用を目指して”, 第 9 回日本加速器学会年会, 2012/8/8-8/12, 大阪大学 (豊中市)。
- ⑱ 松村陽介, 吉田光宏, 周翔宇, 小山和義, A. Aimidula, 上坂充, “レーザー誘電体加速に向けたファイバーレーザーの開発”, 第 9 回日本加速器学会年会, 2012/8/8-8/12, 大阪大学 (豊中市)。
- ⑲ A. Aimidula, K. Koyama, Y. Matsumura, M. Uesaka, T. Natsui, M. Yoshida, “Design of Laser Driven Dielectric Accelerator for Basic Radiation Biology Researches”, 第 9 回日本加速器学会年会, 2012/8/8-8/12, 大阪大学 (豊中市)。
- ⑳ K. Koyama, A. Aimidula, Y. Matsumura, M. Uesaka, M. Yoshida, T. Natsui, “DESIGNING OF PHOTONIC CRYSTAL ACCELERATOR FOR RADIATION BIOLOGY”, IPAC12, 2012/5/20-5/25, New Orleans, LA, (USA).
- ㉑ A. Aimidula, K. Koyama, Y. Matsumura, M. Uesaka, T. Natsui, M. Yoshida, “Designing of a Structure Based Laser Particle Accelerator”, HEDS2012, 2012/4/25-4/27, パシフィコ横浜 (横浜市)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 和義 (KOYAMA Kazuyoshi)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構・先端加速器推進部・特定教授
研究者番号：40357041

(2) 研究分担者

上坂 充 (UESAKA Mitsuru)
東京大学・大学院工学系研究科 (工学部)・
教授
研究者番号：30232739