

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18636

研究課題名（和文）遠赤外レーザー誘電体加速技術の開拓

研究課題名（英文）Research and development of a dielectric laser acceleration technique using far-infrared light.

研究代表者

佐藤 大輔（Sato, Daisuke）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：40780086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、超小型かつ高い加速効率の高エネルギー電子線形加速器の実現を目指して、遠赤外光の光電場を直接用いたレーザー誘電体加速方式の開拓を目的とする。本研究では、誘電体同軸テーパ構造といって、軸対称の加速モードで低速領域から光速まで様々なエネルギー領域の電子加速に適用できる新しいレーザー誘電体加速構造を考案した。また、誘電体加速構造の作製にフェムト秒光加工技術を適用することで、非常に高速に遠赤外波長の誘電体周期構造体を作製することに成功した。最終的には、遠赤外レーザー誘電体加速のビーム加速試験に適したビームラインの設計とビームラインコンポーネントの開発まで完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、高効率発生が可能な遠赤外光を用いたレーザー誘電体加速によって、軸対称の加速モードで低速領域から光速までのエネルギー領域の電子加速に適用できる可能性が示され、オンチップサイズの超小型かつ高効率の高エネルギー電子加速器の実現への大きな一歩であり、基礎科学分野並びに産業界まで幅広い分野に大きな影響を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：To realize an ultra-compact, high-energy electron linear accelerator with high acceleration efficiency, we have promoted the development of a dielectric laser acceleration technique using the optical electric field of far-infrared light. In this study, we devised a new dielectric laser acceleration structure called a dielectric coaxial taper structure, which can be applied to electron acceleration in the energy range from the low- to the speed of light with an axisymmetric acceleration mode. By applying femtosecond laser processing technology to the fabrication of dielectric accelerating structures, we have succeeded in fabricating the dielectric periodic structures at far-infrared wavelength for a few tens of cycles in about a few 10 minutes. Finally, the beamline design and development of beamline components suitable for test bench of the dielectric laser acceleration were completed.

研究分野：加速器科学

キーワード：レーザー誘電体加速 遠赤外光 フェムト秒光加工

1. 研究開始当初の背景

電子線形加速器は、電子 - 陽電子衝突型加速器や高輝度放射光光源、透過型電子顕微鏡などの様々な基礎科学研究で活用される基盤技術である。産業応用面でも電子加速器を用いて発生する高エネルギー X 線を活用した放射線治療装置や大型工業製品や橋梁といった建造物の非破壊検査など非常に多岐にわたる。しかしながら、電子線形加速器の次世代応用を考えると、装置が大型かつ建設・維持コストが非常に高額であることが大きな課題である。

電子線形加速器のサイズやコストは、電子を高エネルギー化するための「加速管」というコンポーネントの性能によって決まっているといえる。現在、電子線形加速器で最も利用されている加速管は高周波加速管とよばれ、金属管内で数ギガヘルツの電磁波を電力源として、電子との電磁相互作用によってエネルギーの授受を行い、電子を高エネルギーに加速する。この高周波加速管の加速効率と加速電界といった加速管性能が電子線形加速器システムの規模を決定する上で重要である。

高周波加速管は、一般に常伝導加速管と超伝導加速管の二つに大別される。常伝導加速管は、高周波数帯(10 GHz 以上)を用いることで、100 MV/m 以上の高い加速電界が得られるという利点があるが、超伝導加速管と比較して加速効率の面で大きく劣っている。一方、超伝導加速管は、加速効率が著しく高いことが最大の利点であるが、クエンチに起因する加速電界の理論限界が存在し、現状、ニオブを用いた空洞で 35 MV/m 程度の加速電界で制限されている。加速効率や加速電界などの加速管性能は、加速管に使用する金属材料の高周波特性でほぼ決まってしまうため、近年、大幅な性能向上には至っていない。金属加速管以外にも、金属管内部に誘電体構造物を装荷した誘電体装荷型加速管も開発されているが、金属加速管の基本原則を踏襲しているため、金属加速管の加速効率や加速電界を上回る高周波加速管は実現していない。以上のような経緯から、加速管の性能向上は鈍化しており、今後の電子線形加速器を用いた研究開発の停滞が懸念される。このような課題を解決するため、これまで高周波を電力源としていた高周波加速から脱却し、レーザープラズマ加速やビーム駆動プラズマ加速、レーザー誘電体加速、テラヘルツ波加速など様々な新しい高電界電子加速技術が開発されつつある。

2. 研究の目的

本研究は、超小型かつ高い加速効率の高エネルギー電子線形加速器の実現を目指して、遠赤外光の光電場を直接用いた誘電体レーザー加速方式の開拓を目的とする。レーザーの光電場を直接用いた電子加速技術は、波長が 1~2 μm の近赤外光を用いた研究開発が主流であるが、加速に用いる光子の波長が非常に短いため、加速構造の製作における工作精度が非常に高く、加速管のアクセプタンス(電子を加速することができる位相空間領域)が極端に小さく、ビームのハンドリングが非常に困難である。本研究では、波長 10.6 μm の光を高効率発振する炭酸ガスレーザーを加速電力源に採用し、加速管製作における工作精度とビームの時空間制御の要求性能を緩和することとした。さらには、工作精度が緩和することで、新たに透明誘電体の 3 次元加工技術として知られる、フェムト秒光加工技術を用いることで、遠赤外光で動作する新たな誘電体加速構造が実現できるのではないかと考えた。

本研究では、フェムト秒光加工技術を最大限に生かし、遠赤外光で有効に動作する誘電体レーザー加速構造についてシミュレーション等で具体的に検討し、その加速構造を実現するために必要な要求性能を明らかにすることを目指した。最終的には、実際の加速管製作試験とその評価等の結果を踏まえて、遠赤外波長域の誘電体レーザー加速方式の実現可能性を明らかにすることを目標とした。

3. 研究の方法

本研究課題の遂行にあたり、以下の三項目に分けて研究を実施した。まず、遠赤外光による誘電体レーザー加速技術の実現に向けて、電磁場理論に基づく理論解析や電磁場シミュレーションを用いて(1)誘電体レーザー加速構造の検討・設計を行った。次に、詳細な加速管の設計を基に(2)フェムト秒光加工を用いた加速構造の製作試験に取り組んだ。(1)と(2)に関しては、それぞれの工程で生じる課題とその改善点を適宜考慮して、加速管の構造や加工方法を変更しながら、いくつかの加速管構造の製作試験を実施した。そして、最終的なビーム加速試験に向けて(3)ビームラインの設計と構築にも取り組んだ。

(1) 誘電体レーザー加速構造の検討・設計

誘電体レーザー加速管は、矩形断面の櫛状構造(回折格子構造)を有する誘電体構造にビーム軸に対して直交する角度から電力源である光を入射し、その振動電場を用いて直接電子加速す

る、位相変調型や共振器型といった加速管（図 1（a））や、金属管内に誘電体同軸構造を装荷した遅波構造に電子ビームと同軸で光を入射し、その導波路の TM_{01} モードで伝搬する電場を用いて加速する誘電体同軸装荷型加速構造（図 1（b））など、様々な種類が考案されている。本研究では、フェムト秒光加工技術の優位性を生かした加速管構造の検討を重点的に行った。具体的には、加速管構造が軸対称な構造（例えば、誘電体同軸装荷型加速管）の場合は、マクスウェル方程式より加速管内を伝搬する電磁場を理論的に解析し、加速管としての有用性や適用可能な速度領域を慎重に検討した。また、誘電体レーザー加速において、一般的な回折格子構造を有する位相変調型や共振器型等についても電磁場シミュレーションを実施し、加速構造の幾何学的な形状を検討した。

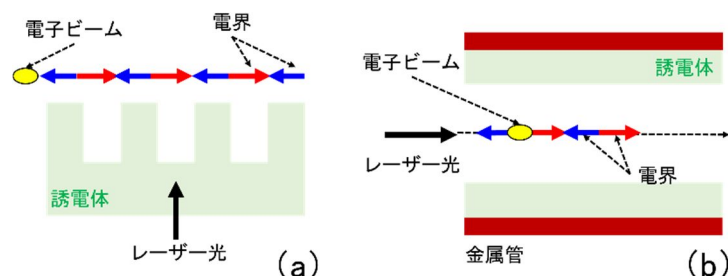


図 1：誘電体レーザー加速管の概念図。(a) 回折格子構造を用いた位相変調型加速構造、(b) 誘電体同軸装荷型加速構造

(2) フェムト秒光加工を用いた加速構造の製作試験

研究代表者が所属するグループでは、フェムト秒レーザーを用いたレーザー加工プラットフォームを運営しており、その設備を用いて誘電体レーザー加速構造の製作試験を実施した。加工試験に使用したフェムト秒光加工装置を図 2 に示す。近赤外フェムト秒レーザーから出射した超短パルス光を加工装置まで輸送し、対物レンズを用いて収束し、誘電体材料の加工を行った。加工の際は、同軸落射照明にて加工焦点の顕微鏡観察を行いながら、加速構造の加工を実施した。本加工試験では、誘電体材料の切削、穴あけ、仕上げ等の加工技術を用いて誘電体レーザー加速構造の製作に取り組んだ。加工後は、レーザー顕微鏡や走査型電子顕微鏡を用いて加速構造の仕上げりを観察・評価した。

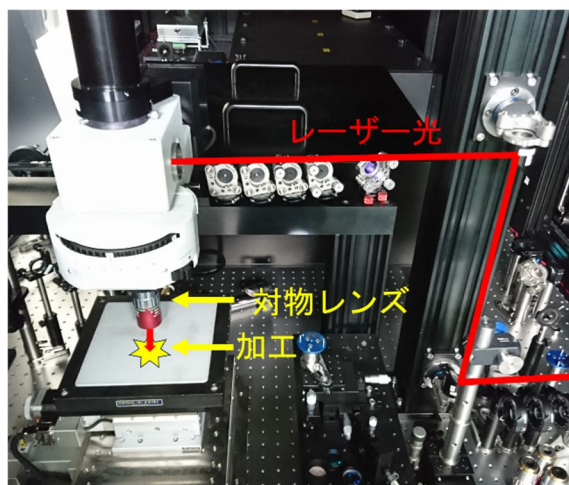


図 2：フェムト秒光加工装置

(3) ビームラインの設計と構築

所有している 100 keV の電子銃システムを改造して、誘電体レーザー加速構造のビーム加速試験を実施するためのビームラインの設計と各種コンポーネントの開発に取り組んだ。遠赤外光を用いた誘電体レーザー加速構造は、近赤外光に比べて波長が長い分、電子ビームの空間制御への要求性能が緩和されるが、それでも加速管の入射口は $10 \mu\text{m}$ 以下と非常に小さい。そのため、非常に輝度が高い短パルスの電子ビームが必要となる。そこで、電子源から加速管までの電子ビーム軌道計算を行い、ビーム加速試験が実施可能なビームラインを設計した。そして、そのビームラインの構築に向けて必要なコンポーネント（電子レンズ、コンデンサーレンズ、集束レンズ等）の機械設計と製作に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 誘電体レーザー加速構造の検討・設計

フェムト秒光加工技術は、ナノファブリケーション技術と比較して、透明誘電体に対して、高いアスペクト比の穴加工や内部加工を実施できる点で優位性があると考えた。そこで、本研究では、透明誘電体の高アスペクト比の穴加工技術を活用した誘電体レーザー加速構造を検討した。いくつか提案されている誘電体加速構造の中で本研究では、図 1（b）に示す誘電体同軸装荷型加速構造に着目した。本加速構造は、誘電体の内外径比を調整するだけで、光電場の進行波の位相速度を調整できる、非常にシンプルな加速構造である。本加速構造の作製には、ビームホールと金属壁面を構成するための切削加工をフェムト秒光加工で実施できれば、誘電体レーザー加

速管では実現されていない軸対称な TM_{01} モード電場による長距離の電子加速が実現できるのではないかという着想に至った。

誘電体同軸装荷型加速構造は、ビーム軸に対して回転対称な構造のため、同構造内を伝搬する光子場モードをマクスウェル方程式より理論的に解析し、加速管としての有用性や適用可能な速度領域等を評価した。そして、誘電体同軸構造の内径と外径の比を徐々に変化させた誘電体同軸テーパ構造(図3(a))とすることで、加速構造内部を伝搬する光電場の進行波の位相速度をシームレスに変更できることを発見した。つまり、誘電体同軸テーパ構造とすることで、誘電体レーザー加速で最も難しい低速領域から光速領域の誘電体レーザー加速に適用可能であることが明らかとなった。誘電体同軸構造の内径を a 、外径を b としたとき、誘電体同軸テーパ構造の内外径比 (b/a) と加速可能な電子の速度 β の関係を図3(b)に示す。図3(b)に示すように、誘電体同軸構造の内外径比を調節することで 100 keV 程度の電子から光速まで電子加速に適用できることが明らかとなった。しかも、一般的な誘電体レーザー加速の場合、低速領域の加速構造は、加速構造の周期が短くなり、加速構造の製作がさらに微細になるのに対して、本構造は速度領域によらず、構造は誘電体壁の厚みは変わるだけで、製作上も非常に簡易化される可能性が示された。また、本加速構造においては、3次元電磁場シミュレーションで構造内部を伝搬する TM_{01} モードの光波長を $10.6\mu\text{m}$ に調整し、位相速度を誘電体同軸構造の内外径比を変化させることで、同じ構造内で変化させることができることを確かめられた。

以上、成果をまとめると、誘電体同軸テーパ構造という新しい誘電体レーザー加速構造を提案し、非常にシンプルな構造で低速領域から光速まで様々なエネルギー領域の電子加速に適用でき、軸対称の加速モードで電子ビームを加速することができる可能性が示された。

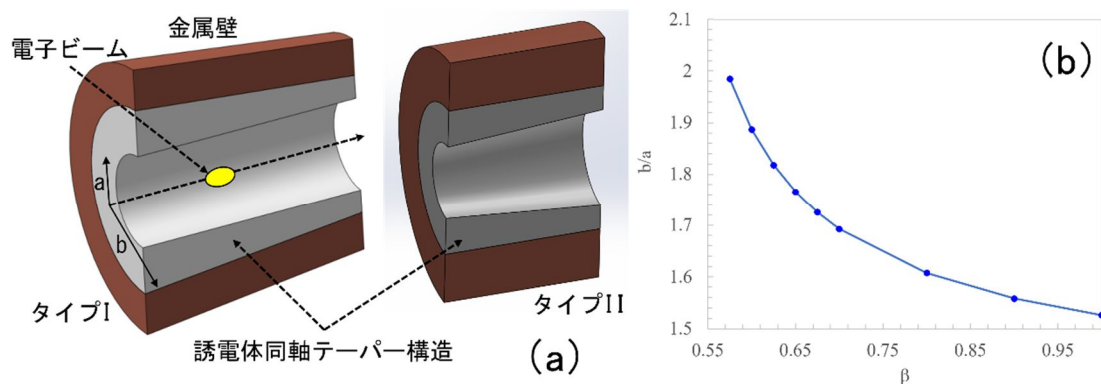


図3 (a) 誘電体同軸テーパ構造の概念図、(b) 誘電体同軸構造の内外径比 (b/a) と加速可能な電子の速度 の関係。

(2) フェムト秒光加工を用いた加速構造を製作試験

図4にフェムト秒光加工を用いて製作した誘電体同軸テーパ構造と回折格子構造を示す。本加工試験では、波長 800 nm パルス幅 100 fs の近赤外フェムト秒レーザーパルスを用いて光加工を実施した。まず、図4に示す誘電体同軸テーパ構造のタイプ II の加工試験で製作したサンプルの、ビーム軸方向から見た光学顕微鏡像(左上図)とビーム軸に垂直な方向から見た断面の電子顕微鏡像(左下図)を示す。本加工試験にて、非常に真円度の高いビームホールかつ本加速構造のコンセプトで提案するテーパ形状を有する構造の形成に成功した。誘電体基板へのテーパ穴加工に続いて、同軸で金属壁を形成するためのレーザー深溝切削加工を実施してきたが、電子の速度が光速に近づくにつれて、誘電体同軸構造の誘電体壁の厚みが薄くなっていくため、その厚みの制御と薄い部分で生じるクラック等の発生が課題となった。この課題の解決する方法としては、非常に出力を下げたレーザーで加工速度を遅くしながら、ゆっくりと追い込みながら深溝切削することで実現できる可能性があり、今後、当該レーザー深溝切削加工条件の探索に取り組んでいく。

誘電体同軸テーパ構造に加えて、非常に一般的な誘電体レーザー構造として知られる、回折格子構造を用いた位相変調型加速構造(図1参照)の加工試験について実施した。その結果、図4の右図に示すように、電子の速度 が約 1 (光速) の加速構造の製作に成功した。本加工試験に関しては、約 20 周期の加速構造の作製を僅か 10 分程度で完了し、非常に効率的に加速構造を作製することに成功した。つまり、加速管の作製にフェムト秒光加工を用いることで、加速管作成時間を短時間で完了できる可能性が示され、本加速構造の量産面で優位な作製技術の開発に成功した。

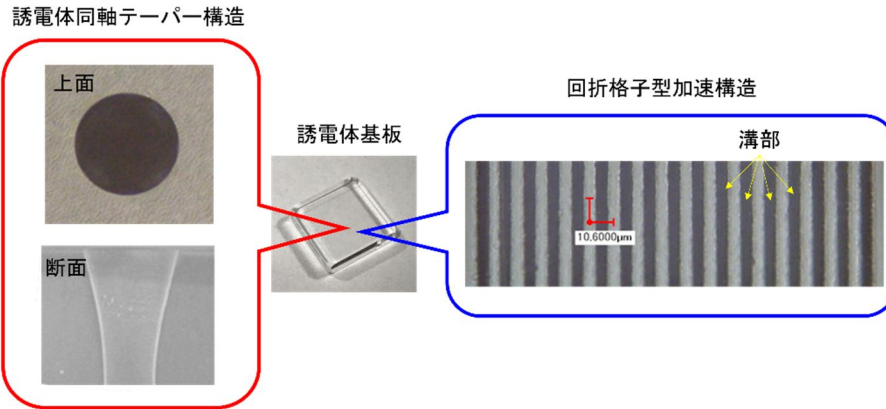


図4 フェムト秒光加工によって製作した誘電体同軸テーパ構造と回折格子構造

(3) ビームラインの設計と構築

遠赤外光を用いた誘電体レーザー加速構造は、加速管の入射口は $10\ \mu\text{m}$ 以下と小さいため、非常に超短パルスかつ高輝度な電子ビームが求められる。そのため、電子源に関しては、タングステン冷陰極を用いたレーザー駆動電界電子放出を用いることとした。そこで、タングステン冷陰極を用いた電子銃と後段の電子ビーム光学系について、電子ビーム軌道計算を実施し、ビームラインの設計を行った。当該ビームラインの設計にあたり、ビームサイズに加えて加速管の内径以下のビームをいかに長距離形成するかに重点を置き、設計を行った。シミュレーションの最適化により、タングステン冷陰極から生成した電子ビームを3枚の静電レンズでビームを輸送し、コンデンサーレンズと対物レンズの2枚の磁気レンズで発散・集束を制御することで、 $10\ \mu\text{m}$ 以下のビーム径を $100\ \mu\text{m}$ 以上距離輸送することが可能なビームラインを設計するに至った。最終的には、この設計をもとに、電子銃や静電レンズ、磁気レンズを含む誘電体レーザー加速構造のビーム加速試験に向けたビームラインコンポーネントの作製を完了した。

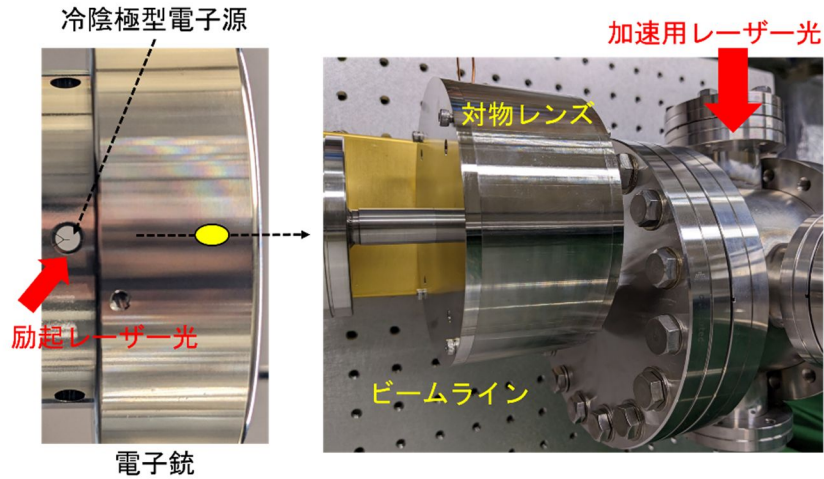


図5：開発した電子銃、加速試験用ビームライン

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 佐藤 大輔	4. 巻 -
2. 論文標題 電子加速技術の最新動向	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 放射線	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤 大輔
2. 発表標題 電子加速技術の最新動向
3. 学会等名 次世代放射線シンポジウム2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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