

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12631

研究課題名（和文）組み合わせ速度集群法を用いた高ピーク強度準単色テラヘルツ光源の開発

研究課題名（英文）Research and Development of A High Peak-Power Quasi-Monochromatic THz Light Source with the Combination of Velocity Bunchings

研究代表者

住友 洋介（SUMITOMO, Yoske）

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：70729243

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：新しい電子パルス圧縮法である「組み合わせ速度集群法」を提唱し、加速器光源の得意とする準単色、高ピーク強度、短時間幅パルス、波長連続可変の性質を兼ね備えたユニークな特徴を併せ持つテラヘルツ光源の開発を行い、有意な強度として測定することに成功している。また、本研究で得られた非線形増幅に関する知見を基に独創的な研究課題の開拓を行うに至っており、国際会議における招待講演などの評価を受けている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ領域の光科学は、近い将来での産業応用性の高さから先端科学として世界的に大きな着目を集めており、産業応用化にむけた黎明期であるといえる。近年の急速な発展はテラヘルツ光の使用難易度が低下したことが一因であるが、テラヘルツ光との相性の良さを活かした上で加速器が得意とするユニークな特徴を持つテラヘルツ光源開発をこの黎明期に行うことで、テラヘルツ科学の進展を先導する可能性を高めると期待される。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new way of electron pulse compression method, namely, the “combination of velocity bunchings”, and applied for the generation of cutting-edge terahertz light sources with distinguished properties including quasi-monochromaticities, high-peak powers, short pulse durations, and continuously variable wavelengths, that are strong points of accelerator based light sources. We successfully observed terahertz lights generated from the undulator. In addition, thanks to the accumulated knowledge of non-linear enhancements during this project, we initiated an ambitious research digging into a new direction over multiple research areas. It is interesting that this new project was worth receiving the invitation from international conference.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：テラヘルツ光 アンジュレーター放射 コヒーレント放射 電子ビーム位相調整 スピンオフ成果

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ領域の光科学は先端科学として世界的に大きな着目を集めるようになっていた。通信として高周波化や、高分子などの分子鎖間の共鳴振動による物質特定など産業的な目的を中心として需要が高まっている中で、光源開発の立場においてもレーザー技術の飛躍的な進展によるテラヘルツ帯高輝度光源の開発と普及が進み、テラヘルツ光の使用難易度が低下したことも相まって、テラヘルツ科学の実用領域への展開の幕開けと言っても過言ではない状況となっていた。このように近い将来での実用性が高く期待されているテラヘルツ科学であるので、関連する国際会議においては非常に多くの研究発表が行われているのであるが、特に気になったのは、中国を始めとした諸外国の参加者や最先端結果の発表が非常に多いのに対し、日本からの発表は中国からの参加者と比べると少なく、テラヘルツの産業応用化にむけた黎明期において、テラヘルツ科学促進に役立てるための独自の光源開発を行う必要性を強く感じていた。

電子加速器は、相対論的効果や電磁場制御に所以する集団効果による高輝度光生成を得意としている。また、テラヘルツ光生成において集団効果による非線形増幅が大きく効いてくるためにはピコ秒以下の時間幅への電子パルス圧縮が必要となるが、現代の加速器技術においては達成可能であり、また、比較的台数が多く使用制限の少ない数十 MeV 程度の加速が可能な小型・中型加速器を用いた開発も行え、この点において加速器とテラヘルツ光生成とは相性が良い。上記状況を踏まえた上で、既存のレーザー光源とは大きく異なり、加速器光源の特徴を活かしたユニークな光源開発を我が国において行うことは、今後のテラヘルツ科学の進展を先導する可能性を高める点で意義のあることである。

2. 研究の目的

本研究では、日本大学理工学部設置されている電子線形加速器を用いて、加速器光源の特徴として、準単色、高ピーク強度、短時間幅パルス、波長連続可変の性質を兼ね備えたテラヘルツ帯域光源開発を行うことを目的としている。単色性の高い光源は特有の分子(鎖)振動を集中的に励起することに向いており、さらに、高ピーク強度で短時間に照射することで従来知られていた線形的物質反応を超える非線形応答領域の開拓に繋がると期待できる。また、電子線形加速器ではエネルギーを自由に換えられることから発生する光の波長を連続的に変えることができ、特有の集中励起現象を引き起こす光源として多様な物質に対応できるのが強みである。

上記特徴を併せ持つ光生成の方法として、加速器で加速と時間的電子パルス圧縮を実現し、それをアンジュレーターの周期磁場と相互作用させることで、テラヘルツ領域における準単色コヒーレントアンジュレーター放射を発生させることができる。特に、電子パルス圧縮に関して、進行波加速管の高周波位相制御により実現される速度集群法を応用し、日本大学の 3 本の進行波加速管による加速とさらには減速をも組み合わせた上でより圧縮効果を高めることのできる「組み合わせ速度集群法」を提唱し[1]、これの実験的実証をも目的としている。従来の速度集群法では加速と圧縮を同時に行うことからエネルギーの選択自由度がなく、アンジュレーターギャップの可変範囲での放射波長変更しかできないのであるが、「組み合わせ速度集群法」では加速と減速を組み合わせることから有効となるパラメーター領域が拡大し、電子パルスの十分な圧縮を保ちつつも電子ビームのエネルギー変更が行うことができ、より広範囲での放射波長連続可変性を兼ね備えることを可能とするのが特徴である。

3. 研究の方法

「組み合わせ速度集群法」には既存の加速器設備を用いて 3 本の進行波加速管の独立した位相制御調整を用いる。位相が変わると加速や減速により通過する電子ビームのエネルギーが変わるので、電子ビームの制御には用いている各種電磁石も合わせて徐々に変更により調整を行う必要がある。

また、既存のアンジュレーターにおいてテラヘルツ帯放射を発生させるためには、25 MeV 以下に電子ビームのエネルギーを下げる必要があるが、低いエネルギーのビームから発生する光放射は広い発散角を持つことになる。このため、発生したテラヘルツ光を取り出すためにはアンジュレーター直後の真空中に鏡を設置し取り出す必要がある。そこで、他の実験との干渉も考慮し、アンジュレーター装置直後に真空チャンバーを設置し、その中に通過する電子ビームと共存可能な穴あき金凹面鏡を、圧縮空気動作で出し入れ可能となるよう設置した(図 1 参照)。金凹面鏡で直交方向に反射した光は、テラヘルツ帯でも十分な透過性を持つサファイア窓にて真空外に取り出され自由空間検出器にて測定可能となる。また、広い発散角で発生するテラヘルツ光の輸送損失を軽減するため、アンジュレーター装置の真空ダクトを円形のものから長方形のものへと取り替え、片方向だけでも多くの光が取り出せるよう変更を行った。こうして発生したテラヘルツ光を測定することで、集団効果(コヒーレント放射)による非線形増幅が起こるための、「組み合わせ速度集群法」による電子パルス圧縮の運転条件探索を行うことが可能となる。なお、

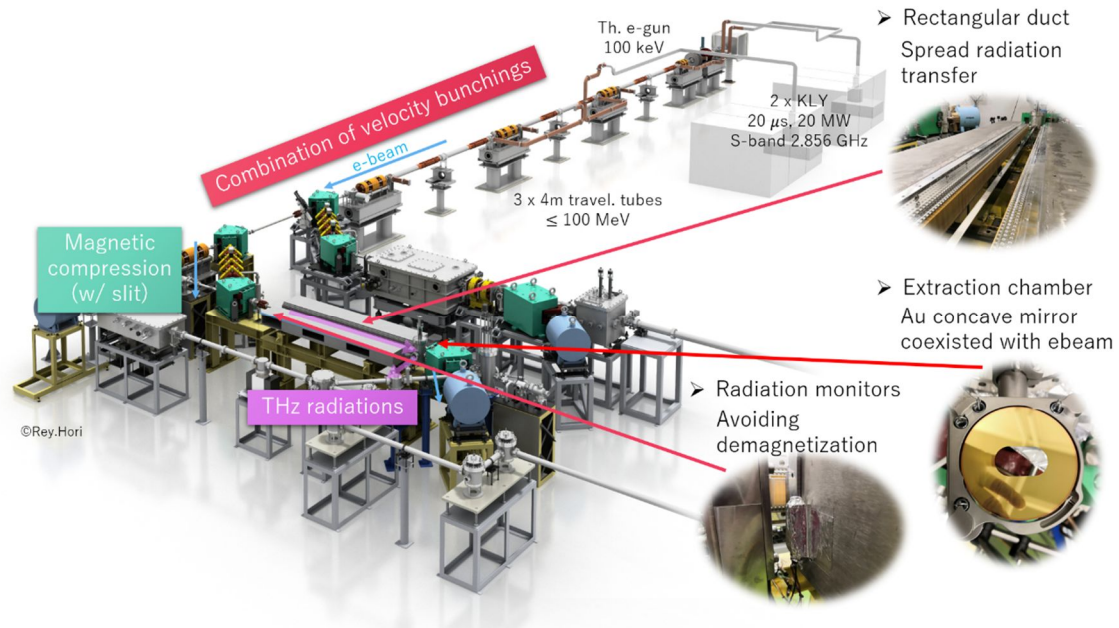


図 1 テラヘルツ放射発生のための装置概略図[2]。線形加速器部で「繰り返し速度集群法」の位相制御調整を行い、90度曲がった後にアンジュレーター装置で発生するテラヘルツ放射は、その直後の穴あき金凹面鏡で取り出し測定。アンジュレーター磁石劣化を防ぐための放射線モニターも設置した。

位相制御調整中は大幅な電子ビーム変動が起こり、真空ダクト壁面等におけるビーム損失から多量の放射線が発生する。特にアンジュレーター装置を構成するネオジウム磁石は放射線に弱く磁力の低下による性能劣化が予想されるため、アンジュレーター前後に CsI シンチレーターと光電子増倍管から構成される放射線モニターを 3 台製作の上設置し、放射線量が多くならないよう慎重に運転調整を行うこととした。

4. 研究成果

各種必要機器設置後に運転調整を開始した。目的のテラヘルツ帯放射のためには電子ビームのエネルギーを 25 MeV 以下にする必要があるのだが、日本大学の加速器においてこれほど低いエネルギーでアンジュレーター装置にビームを入射させたことはなく初の試みとなる。そこで、既存の 67.6 MeV での運転パラメーターを用いて始めることとし、加速用高周波入力位相制御調整とともに、収束や軌道を調整する各種電磁石を徐々に変更することでビームエネルギーを下げていき、13.5 MeV もの低いエネルギーでの電子ビームをアンジュレーター装置を含めて正常に通過させることに成功した。特に、偏向電磁石部では偏向のための磁力確保の観点から真空ダクトとして非常に径の細いものを使用しており、変化しやすい低いエネルギー状態での電子ビームを、アンジュレーター磁石に対する放射線の影響を十分に低減した上で通過させることができたのは何よりであった。

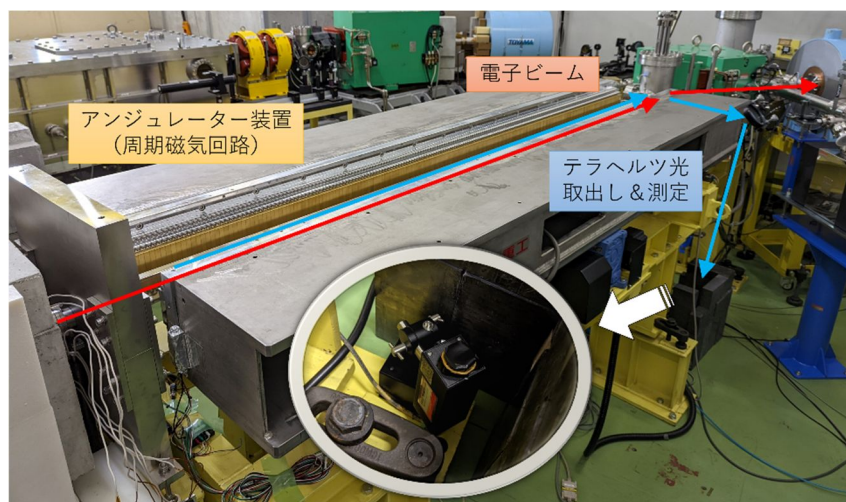


図 2 アンジュレーター装置付近における測定概略図。真空中から取り出されたテラヘルツ光はアルミ鏡で下部に輸送されパイロ検出器で電圧として測定される。

アンジュレーターにおけるテラヘルツ放射のための条件に合う電子ビームの準備が整ったので、アンジュレーターの磁石間隔を狭めて周期磁場との相互作用実験を行った。より詳細な実験概略図を図 2 に示す。周期磁気回路の磁場と相互作用して発生したテラヘルツ光はアンジュレーター下流に設置された穴あき凹面鏡により真空外に取り出された後、下方に設置された測定器に輸送される。取り出し用の凹面鏡の曲率は床面付近で収束するように設計したものである。測定に使用したのは CDP 社製のパイロ検出器 PD-1 であり、**0.02-3 THz** の周波数帯域に検出感度を持つ。

測定器における出力をオシロスコープで測定した結果を図 3 に示す。ここで、電子ビームは **2.856 GHz** の繰り返しの電子パルスとして生成されるモードにて運転を行っているが、その電子パルス列は持続時間として **4 マイクロ秒** 程度である。パイロ型の検出器では一般的に熱的緩和時間としてより長い時間スケールの信号となり、測定値も長い時間構造を持っている。なお、図 3 ではビーム非照射時の背景ノイズを差し引いた上での信号値であり、電子ビームに由来したテラヘルツ光の有意な信号強度での測定が行えていることがわかる。また、実験の際には短波長域遮断フィルムとして中赤外帯域以上での透過率は低いですがテラヘルツ帯域で十分な透過性を持つ、オリジン社取扱の **BPP** フィルムを用いた上で測定を行っている。**BPP** フィルム有り無しに関わらず信号強度に大きな差はなく、このことからテラヘルツ帯域が信号の主成分となっているといえる。

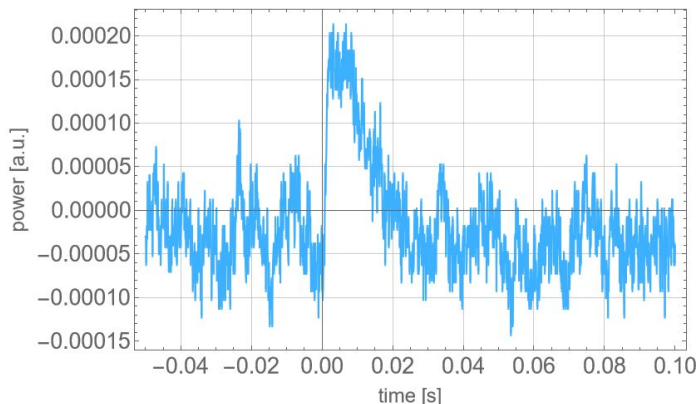


図 3 パイロ検出器における背景ノイズを引いたあとのテラヘルツ信号測定の様子。

実験プロジェクトを開始して、特に 2 年目以降から現在に至るまで新型コロナウイルスに伴う大きな行動制約を受けるようになり、ビームタイムを含め直接的にも間接的にも実験活動に大きく影響することとなった。日本大学の加速器では電子パルスの持続時間として最大 **20** マイクロ秒まで伸ばすことが可能であるが、期間中の実験としてはビームの大幅調整に伴う放射線の影響を最小化する観点から **4** マイクロ秒程度に制限の上でビーム調整を行っており、テラヘルツ光の観測もこのビーム状態で行なったものである。テラヘルツ光は電子パルス毎に生成されそれが積算されることから **4** マイクロ秒では十分な放出量を期待していなかったのであるが、図 3 のように信号強度の観測に成功できているのは有意な成果である。ただ、残念ながら運転時間の制限が大きく影響し、発生した波長成分の分光解析やビーム電流変化によるコヒーレント性の確認実験までには至っていない。

また、副産物としての成果にも言及しておく。本研究では集団効果によるコヒーレント放射とその非線形放射増幅現象が鍵となるプロジェクトであるが、研究遂行過程により得られた知見を基にして新たな研究課題の発案にも繋がっている。これは、宇宙で観測されている原因不明の高速電波バースト現象に対し、コヒーレント放射を含む非線形増幅現象をヒントに加速器を用いて実験室で再現することを目的とした独創的なプロジェクトであるが、加速器とは異なる分野の国際会議において招待講演を行うに至っており、本研究の副産物としての有意な成果であるといえる。

< 引用文献 >

- [1] Y. Sumitomo et al., "Simulation for THz coherent undulator radiation from combination of velocity bunchings," J. Phys.: Conf. Ser., 1067 032017 (2018).
- [2] Y. Sumitomo et al., "Toward THz Coherent **Undulator Radiation Experiment with a Combination of Velocity Bunchings**", Proceedings of 12th IPAC, TUPAB116, 1663 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 3件）

1. 著者名 Yoske Sumitomo, Ken Hayakawa, Yasushi Hayakawa, Kyoko Nogami, Takeshi Sakai, Toshinari Tanaka	4. 巻 IPAC2021
2. 論文標題 Toward THz Coherent Undulator Radiation Experiment with a Combination of Velocity Bunchings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference	6. 最初と最後の頁 1663-1665
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB116	査読の有無 無
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 住友 洋介, 浅井 朋彦, 木坂 将太, 境 武志, 早川 恭史, 熊谷 紫麻見, 小林 大地, 関 太一, 稲垣 滋, 川中 宣太, 小口 治久, 清 紀弘	4. 巻 PASJ2021
2. 論文標題 加速器とプラズマを用いた宇宙高速電波バースト現象への実験室的挑戦	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 404-407
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 住友 洋介, 境 武志, 清 紀弘, 早川 建, 早川 恭史, 黒澤 歩夢, 野上 恭子, 岡崎 大樹, 田中 俊成	4. 巻 -
2. 論文標題 日大での準単色コヒーレントTHzアンジュレーター放射に向けた開発状況	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 428-431
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yoske Sumitomo, Tomohiko Asai, Shota Kisaka, Yasushi Hayakawa, Shigeru Inagaki, Norita Kawanaka, Daichi Kobayashi, Haruhisa Koguchi, Shiomi Kumagai, Takeshi Sakai, Norihiro Sei, Taichi Seki
2. 発表標題 An Experimental Challenge with Accelerator and Plasma to Astrophysical Fast Radio Bursts
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2021 / High Energy Density Sciences 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Yoske Sumitomo, Ken Hayakawa, Yasushi Hayakawa, Kyoko Nogami, Takeshi Sakai, Toshinari Tanaka
2. 発表標題	Toward THz coherent undulator radiation experiment with a combination of velocity bunchings
3. 学会等名	International Particle Accelerator Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	住友洋介, 浅井朋彦, 木坂将太, 境武志, 早川恭史, 熊谷紫麻見, 小林大地, 関太一, 稲垣滋, 川中宣太, 小口治久, 清紀弘
2. 発表標題	加速器とプラズマを用いた宇宙高速電波バースト現象への実験室的挑戦
3. 学会等名	第18回日本加速器学会年会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yoske Sumitomo, Tomohiko Asai, Shota Kisaka, Haruhisa Koguchi, Kazuhiro Kusaka, Ryotaro Yanagi, Yuma Onishi, Yasushi Hayakawa, Daichi Kobayashi, Shiomi Kumagai, Takeshi Sakai, Taichi Seki
2. 発表標題	A Laboratory Astrophysical Project Toward Understanding Mysterious Fast Radio Bursts
3. 学会等名	International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	住友洋介
2. 発表標題	日大での準単色コヒーレントTHzアンジュレーター放射に向けた開発状況
3. 学会等名	第17回日本加速器学会年会
4. 発表年	2020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
---------	---------