

## 日本大学 LEBRA におけるテラヘルツ波光源開発

### DEVELOPMENT OF TERAHERTZ SOURCES AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

境 武志<sup>#, A)</sup>, 清 紀弘<sup>B)</sup>, 早川恭史<sup>A)</sup>, 住友洋介<sup>C)</sup>, 早川 建<sup>A)</sup>, 田中俊成<sup>A)</sup>, 野上杏子<sup>A)</sup>, 高橋由美子<sup>A)</sup>  
Takeshi Sakai<sup>#, A)</sup>, Norihiro Sei<sup>B)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Yoske Sumitomo<sup>C)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>,  
Kyoko Nogami<sup>A)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

<sup>B)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

<sup>C)</sup> College of Science and Technology (CST), Nihon University

#### Abstract

LEBRA at Nihon University is conducting collaborative research with the High Energy Accelerator Research Organization and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology to enhance a 100 MeV linac. Using the accelerator, we are developing free-electron laser (FEL), parametric X-ray radiation (PXR), and terahertz (THz) radiation sources. These sources are shared with both internal and external collaborators. THz sources are being developed on both the FEL and PXR lines, focusing on Coherent Edge Radiation (CER), Coherent Transition Radiation (CTR), and planar wave Coherent Cherenkov Radiation (CCR) in the THz band. The CCR source utilizes an artificial quartz hollow conical tube, and fundamental measurements are ongoing. For the CTR source, we are developing a simple CTR optical vortex source with a helical surface on a conductive target, and basic measurements such as profile and spectral measurements are in progress. This paper will report on the development and application of these various THz sources.

#### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 LEBRA では、高エネルギー加速器研究機構と産業技術総合研究所との共同研究により、100 MeV 電子線型加速器の高度化、自由電子レーザー (FEL)、パラメトリック X 線放射 (PXR) とテラヘルツ波 (THz) 光源開発を行っている。各光源は学内外の共同利用に用いられている[1-9]。THz 源は FEL ライン、PXR ラインそれぞれで開発しており、THz 帯のコヒーレントエッジ放射 (CER) 光源開発、コヒーレント遷移放射 (CTR) 光源開発に加え、平面波コヒーレントチェレンコフ放射 (CCR) 源開発を行っている。CCR 光源には人工水晶中空円錐管を用いており、各基礎測定を進めている。また CCR 光源部の機構上部には、CTR 光源のターゲット形状をらせん状にした簡易的な THz 帯の CTR 光渦光源の開発を進め、ビームプロファイルやスペクトル測定など基礎測定を行っている。本発表では、これら各 THz 源開発等に関して報告を行う。

#### 2. LEBRA テラヘルツ波光源

日本大学 LEBRA では、Fig. 1 に示される 100 MeV の電子線形加速器の高度化により、FEL ビームラインと PXR ビームラインで THz 光源開発を進めている。各ビームラインでは、電子ビームからビームダンプ前の偏向電磁石入口で放射する THz 帯域の CER を主に開発、応用利用している。この他、X 線のビームラインでは、CTR、CCR、CTR の光渦開発を進めている。この各ビームラインで発生させている CER は、バンチ長評価利用への応用や、FEL ラインでは FEL 制御などの応用等を目指している。また、どちらのビームラインにも FEL や X 線と THz を重畳させて実験室へ輸送するための重畳輸送光学系

<sup>#</sup> sakai.takeshi@nihon-u.ac.jp

を構築している。FEL ラインでは、この重畳輸送ラインを用いることで、FEL と THz-CER の同時測定に成功している[10]。

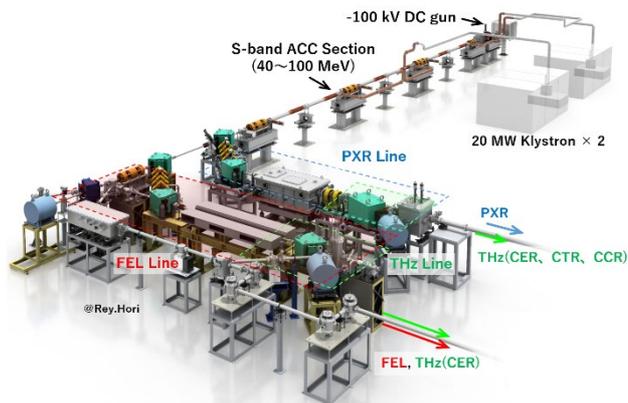


Figure 1: LEBRA 100 MeV electron linac.

##### 2.1 FEL ラインテラヘルツ波光源と重畳ビームライン

FEL ラインでは、FEL と THz-CER の同時測定のため、全反射凹面ミラーに加え、穴あき凹面ミラーを設置している[11]。THz-CER は環状分布を有するため、穴あきミラーを用いる事で FEL ビームの回折損失なしに、アンジュレーター内の光共振器内から取出しが可能となっている。ただし、偏向電磁石内の真空チャンバーの構造及び設置制限から、開口直径は水平面放射角約 30 mrad までに制限されている。

FEL ラインの重畳輸送ラインでは、全反射ミラー挿入時の THz の強度は 0.5 mJ/マクロパルス、波長範囲は 0.1 ~ 2.5 THz を得ている。このような THz 反射用ミラーに穴あきミラーを用いた事で、THz-CER と FEL 発振の同時測定が可能となっている[11]。このように FEL ラインの THz

と FEL の重畳ビームラインでは、電子バンチによって生成されるコヒーレント放射スペクトル測定から電子ビームの状態を THz-CER を用いて発振状態を保ちながらモニタリングが可能であり、さらには FEL と THz のポンププローブ測定など応用実験の可能性も期待できる。

高速応答の THz 検出器を用いた FEL 発振時の THz-CER の計測試験を始めており、FEL 発振時のマイクロパルスからの THz-CER 測定が可能となった。マクロパルスの前半から後半にわたって、マイクロパルス毎の構造が一定ではなく安定していないことも分かってきた。FEL 発振時のマクロパルス全体にわたる THz-CER の出力変化を測定することで、FEL のスペクトル、発振強度測定への計測応用及び、電子ビーム調整への指標など複合的計測、制御への応用を検討している。

## 2.2 PXR ラインテラヘルツ波光源

PXR ラインでは、X 線と THz を目的光源に応じて切替え可能なミラーシステムを設置することで、重畳ビームラインが構築されている[7, 8, 10]。この THz 重畳輸送ラインでは水平、垂直面の収差をなくすため、トロイダルミラーを設置している。X 線ビームラインでの THz 源としては、CER、CTR、CCR、CTR の光渦を開発している。

この X 線ビームラインでの THz 測定系には、測定系の周辺の空気中水蒸気吸収の影響を抑えるため、一般的なグローブボックスを改良した超乾燥空気環境システムを導入し、スペクトル測定時の水蒸気吸収の影響を抑えるように対策をしている。湿度測定には絶対湿度センサーでモニターしており、超低湿環境での測定が可能となっている。このような測定環境で、THz-CER が利用できる周波数帯域は 0.1 ~ 4 THz 弱、出力強度は 1 mJ/マクロパルスとなっている。

X 線のビームラインでは、THz-CER をユーザー共同利用実験に利用中である。特に薬剤、水蒸気量等に関する共同研究を実施している。薬剤のスペクトル分析では、ポリプロピレンやダイラクトーズなどの賦形剤の含有量の違いと THz スペクトルの変化に関する測定を実施しており、スペクトルの違いから含有量の割合を判定するなど試験を実施している[12]。その他に、THz に対する水の吸収周波数帯域付近に注目し、その周波数帯を限定することで、スペクトル変化から空気中の絶対水蒸気量を換算するなど応用もおこなっている[13]。

THz-CCR 光源には、THz 帯域で透明な人工水晶で製作した中空円錐管の誘電体を用いている[10]。このようなターゲットでは誘電体内の吸収を無視でき、ビーム入射方向に対して円錐形の形に配置することで、管内に発生した CCR は円錐管底面で位相を揃えることが可能である。このターゲットを用いた CCR の発生は確認できたが、強度が想定しているよりも低いことが分かった。ただし、THz-CCR 発生が確認できたことから、円錐管の形状などは問題無いが、円錐管の軸と円錐管内を通す電子ビームの軸との位置合わせが難しく、ビーム軌道の調整不足が原因である事が分かってきた。しかし、X 線のビームラインの THz 発生部周辺はステアリング設置箇所がなく、電子ビームの軌道調整に限界があるため、X 線ビームライン中のビームポジションモニター設置部などの隙間箇所などを候補に、ステアリングの設置検討が必要であり、今後改良を進めていく予定である。

この他に、X 線ビームラインでは電子ビームを金属ターゲットに当て生成させる CTR 光源開発で用いているシステムを改良し、CTR 光渦の光源開発を進めている[10]。この CTR 光渦光源では、金属ターゲットの表面形状をらせん状にした簡易的な THz 帯域の CTR の光渦光源となっている。らせん形状に加工したターゲットの設置時の様子を Fig. 2 に示す。ターゲットの材質は加工のしやすさからアルミとし、渦度は 1 とした。ターゲット設置箇所の下には CCR 光源用の人工水晶中空円錐管が設置されている。CTR 光渦は、THz 用カメラとレンズ集光系を用いたプロファイル測定から発生が確認できた。また、渦度が 1 の単純なターゲットを製作して試験を行ったが、ターゲットのらせん構造の応用も進めている。具体的には、Fig. 3 に示すようなメカニカルシャッターをベースに、

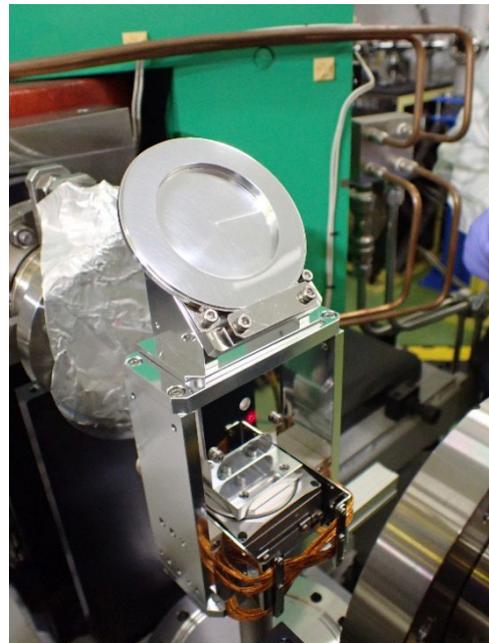


Figure 2: View of the spiral target installation for CTR vortex.



Figure 3: View of the target with the shutter portion modified with a titanium blade.

シャッター部分をチタンブレードに改良した厚さ方向が可変なターゲットの製作、金属 3D プリンターを用いたチタン製らせんターゲットの製作を進めており、試験を検討中である。

### 3. まとめ

LEBRA では、遷移放射、コヒーレントチェレンコフ放射、遷移放射の光渦の光源開発、共同利用を行っている。FEL ラインでは、THz 帯域のエッジ放射を用いたビーム評価利用、FEL 制御、応用利用等を目指した輸送光学系、重畳ラインの構築を進め、FEL とエッジ放射の同時測定が可能となっている。THz 測定に高速応答ディテクタを導入し、FEL 発振時のマクロパルス内の変化測定、FEL 発振時のスペクトルとの比較、発振強度との関連性など複合的計測応用を検討中である。PXR ラインでは、エッジ放射、チェレンコフ放射、遷移放射、遷移放射光渦の光源開発を進め、応用利用を拡充している。ユーザー共同利用実験では、薬剤、賦形剤等の吸収スペクトル、大気中の水蒸気量評価に関する測定などを行っている。チェレンコフ放射に関しては、発生を確認できたが、ビーム軌道調整に問題があることが分かかってきており、ステアリング等ビーム軌道の調整機構の検討が必要となっている。遷移放射の光渦光源では、らせん形状のターゲットを製作し、プロファイル測定を行い、THz カメラと集光系を用いたプロファイル測定から発生が確認できた。らせん構造のターゲットの応用に関しては、メカニカルシャッターをベースに厚さ方向に可変なターゲットの製作や、金属 3D プリンターでのターゲット製作を進めている。

### 謝辞

本研究開発の一部は JSPS 科研費 16H03912、JP19H04406、21K12539 の助成及び、競輪の補助を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

### 参考文献

- [1] T. Sakai, “Development and application of electron linac at LEBRA in Nihon University”, 放射光, May 2021 Vol.34 No.3, pp.153-162.
- [2] Y. Hayakawa, Y. Takahashi, “ Diffraction-enhanced imaging and elemental imaging based on K-edge subtraction as applications of a parametric X-ray source

- driven by an electron linac”, 放射光, March 2020 Vol.33 No.2, pp.87-94.
- [3] T. Sakai *et al.*, “Evaluation of Bunch Length by Measuring Coherent Synchrotron Radiation with a Narrow-Band Detector at LEBRA”, *Condens. Matter* 2020, 5(2), 34, <https://doi.org/10.3390/condmat5020034>
- [4] N. Sei *et al.*, “Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, *J. Phys. D*, vol. 46, pp.045104, 2013.
- [5] N. Sei *et al.*, “Characteristics of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA”, *Proceedings of FEL2014*, Basel, Switzerland, pp.541-544.
- [6] T. Sakai *et al.*, “Development of coherent edge radiation source at FEL beam line in LEBRA”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, pp.465-467.
- [7] Y. Hayakawa *et al.*, “Project on the superposition of beamlines for parametric X-ray radiation and coherent transition radiation in the THz region at LEBRA”, *Journal of Physics: Conference Series* 732 (2016) 012013.
- [8] N. Sei *et al.*, “Millijoule terahertz coherent transition radiation at LEBRA”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 032401 (2017).
- [9] 境武志 他, “日本大学電子線利用研究施設におけるコヒーレントエッジ放射の光源開発”, *日本赤外線学会誌*, 2022, 31, 2, pp.76-83.
- [10] T. Sakai *et al.*, “日本大学 LEBRA 電子線形加速器を用いた高強度テラヘルツ光源の研究開発”, *Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University), pp.313-315.
- [11] T. Sakai *et al.*, “Research and Development of Terahertz Sources at LEBRA-PXR Beam Line in Nihon University”, *Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, August 9 - 12, 2021, QST-Takasaki Online, Japan, pp.568-571.
- [12] Hikaru Kinoshita, Norihiro Sei, Takeshi Sakai, Akihito Otani, “Repeatability Evaluation of Medicine Absorption Peaks Using Terahertz Waves at LEBRA”, 4-0492, *ICEE2022@Seoul*, 2022.
- [13] 山添亮, 木下燿, 清紀弘, 境武志, 大谷昭仁, IM21-033, “テラヘルツ波分光計測における水蒸気の吸収軽減および吸収補正に関する検討”, *電気学会 計測/知覚情報合同研究会*.