

## 産総研 S バンド小型リニアックとその応用

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 平 義隆\*, 黒田 隆之助

This article reviews machine status of a S-band compact electron linac at AIST, and radiation sources such as laser Compton scattered (LCS) hard X-rays and terahertz radiations. The LCS hard X-rays can be generated by a collision between energetic electron and high-power Ti:Sa laser beams. The LCS X-rays are tunable in energy, quasi-monochromatic, and highly polarized. Phase-contrast imaging using the LCS X-rays is expected as an useful method for observing the soft tissues. The terahertz radiation can be generated via coherent synchrotron radiation and coherent transition radiation. Scanning transmission imaging using a W-band RF detector demonstrated that the terahertz radiation is the powerful tool for measuring the freshness of a vegetable. Polarization states of a radially polarized coherent transition radiation were measured by using a terahertz camera and a wire-grid linear polarizer. Bow-tie intensity distributions, aligned along the polarization direction, were clearly observed. Radially polarized terahertz radiation becomes a promising tool for high spatial resolution terahertz imaging.

**Keywords:** linear accelerator, laser Compton scattering, hard X-ray, terahertz radiation, coherent radiation

## 1 はじめに

本稿では、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (以下、産総研) の電子線形加速器である S バンド小

型リニアックを用いた光源開発とその応用研究について述べる。

最初に S バンド小型リニアックが産総研に導入された経緯について触れる。詳しくは参考文献<sup>1)</sup>に書かれているのでここでは簡単に述べる。平成 7 年度から平成 16 年度まで、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けた技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構 (FESTA) と産総研の共同研究によってフェムト秒テクノロジープロジェクトが実施された。S バンド小型リニアックは、このプロジェクトの期間中に FESTA の分散研の一つであった住友重機械工業 (株) を中心に開発されたものである。平成 16 年度のプロジェクト終了後に住友重機械工業 (株) より産総研へと加速器とレーザー装置一式が移管された。

それから 10 年の間に、電子銃の改造やマルチバンチ電子加速のための最適化等加速器自体の改良に加えて、レーザーコンプトン衝突用レーザーの増強を進めつつ高輝度超短パルス電子ビームをベースとする光源開発とその計測技術開発及び応用展開を行ってきた。具体的な研究開発内容は、レーザーコンプトン散乱 (LCS) 硬 X 線の高強度化と医用イメージング等の応用研究の他<sup>2,3)</sup>、テラヘルツ領域におけるコヒーレント放射の発生手法と計測技術開発である<sup>4-8)</sup>。

S バンド小型リニアックは、放射光施設等とは違い共同利用施設として公開されていないが、産総研外部の研究者が利用したい場合には、共同研究契約を締結すれば比較的自由に施設を利用することができる。企業からの問合せや依頼も年間数件程度あり、適宜対応している。最近では、テラヘルツ関連の問合せが多くなっている。

第 2 節では S バンド小型リニアックの装置概要について説明し、第 3 節ではレーザーコンプトン散乱硬 X 線の概要と X 線位相イメージング手法の開発について述べ、第 4 節ではコヒーレントテラヘルツ波の発生とその計測技術開発について述べる。

S-band Compact Electron Linac at AIST and its Application  
Yoshitaka TAIRA\* and Ryunosuke KURODA (National Institute of  
Advanced Industrial Science and Technology (AIST)),  
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第 2  
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 分析計測標準研究部門  
TEL: 029-861-2095, FAX: 029-861-5683,  
E-mail: yoshitaka-taira@aist.go.jp

## 2 Sバンド小型リニアックの装置概要

Sバンド小型リニアックの全体図を Fig. 1 に示し、主な性能を Table 1 に示す。入射器には、 $\text{Ce}_2\text{Te}$  のフォトカソード RF 電子銃を使用し、パルスエネルギー 150  $\mu\text{J}$ 、パルス幅 3 ps の UV レーザーを照射することで高電荷量でマルチバンチの電子ビームを発生することができる。電子銃の後段には、収束用のソレノイド電磁石と長さ 1.5 m の定在波加速管 2 本が設置され、電子ビームを 40 MeV まで加速できる。加速管の後段にあるアクロマティックアーク部は、2 台の 45 度偏向電磁石と 4 台の 4 極電磁石で構成される。このアクロマティックアーク部では、電子ビームのバンチ長をそのままの状態で輸送することもできるが、エネルギー分散を用いた電子ビームのバンチ圧縮を行うことが可能である。

最初に、加速管出口における電子ビームのエネルギー分布が、前方のエネルギーが高く、後方のエネルギー

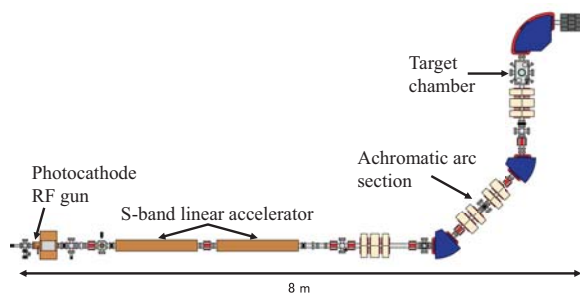


Figure 1. Schematic illustration of the S-band compact electron linac.

Table 1. Parameters of electron beam and Ti:Sa laser<sup>1)</sup>.

|               |                    |                                            |
|---------------|--------------------|--------------------------------------------|
| Electron beam | Energy             | < 42 MeV                                   |
|               | Energy spread      | 0.2 %                                      |
|               | Charge             | 1 nC/bunch                                 |
|               | Bunch length (rms) | < 3 ps                                     |
|               | Beam size (rms)    | 43 $\mu\text{m}$ $\times$ 30 $\mu\text{m}$ |
|               | Repetition rate    | < 50 Hz                                    |
| Ti:Sa laser   | Wavelength         | 800 nm                                     |
|               | Pulse energy       | 140 mJ                                     |
|               | Pulse width (FWHM) | 230 fs                                     |
|               | Repetition rate    | 10 Hz                                      |

ギーが低くなるような加速位相で電子を加速する。その電子ビームが 45 度電磁石を通るとエネルギーの高い前方の電子は外側の軌道を通り、エネルギーの低い後方の電子は内側の軌道を通るのでアクロマティックアーク部で前方の電子が後方に移動し、後方の電子が前方に追いつく。このことを利用し、電磁石等の磁場強度を最適にすることでアクロマティックアーク部出口での電子ビームのバンチ長を 1 ps 以下に圧縮することができる。このサブピコ秒電子ビームの発生は、コヒーレントテラヘルツ波の発生において非常に重要である。

アクロマティックアーク部を出た電子ビームは 3 台の 4 極電磁石で収束され、ターゲットチャンバーへと導かれる。このチャンバーにおいて、LCS-硬 X 線を発生する場合は、Ti:Sa レーザーと衝突させ、コヒーレントテラヘルツ波を発生する場合は、電子ビームを誘電体ターゲットに通過させることで遷移放射または回折放射を発生させることができる。また、圧縮された電子ビームをターゲットチャンバー直後の 90 度偏向電磁石を通過させると、コヒーレントシンクロトロン放射も発生させることができる。最終的に電子ビームは偏向電磁石直後のステンレス製水槽へダンプされる。

## 3 レーザーコンプトン散乱 (LCS) 硬 X 線源

### 3.1 LCS の概要

LCS は、相対論的な運動をしている電子にレーザーを衝突させ、レーザー光子の逆コンプトン散乱によって X 線を発生する手法である。逆コンプトン散乱による高エネルギー光子の発生は、星間空間における高エネルギー電子のエネルギーロスのメカニズムを解釈するために、Feenberg らが 1948 年に提唱した<sup>9)</sup>。その現象を加速器で生成される電子ビームに適用し、GeV クラスの高エネルギー X 線が発生可能であると 1963 年に提唱したのは Arutyunian らと Milburn であった<sup>10,11)</sup>。その後、Kunikov らが 1964 年に旧ソ連 Lebedev Physical Institute の 600 MeV シンクロトロンと波長 694 nm のルビーレーザーを用いて、エネルギー 8.3 MeV の LCS-X 線の発生を世界で初めて観測した<sup>12)</sup>。

LCS によって発生する X 線の特徴として、

- エネルギー可変でかつ準単色
- 高い偏光性
- 高い指向性

が挙げられる。特に、エネルギー可変の準単色 X 線源

を LCS で発生できることが大きな特徴である。X 線のエネルギーは、近似的に電子ビームのローレンツ因子 (電子ビームの全エネルギーと静止エネルギーの比) の二乗に比例するため、電子ビームエネルギーが GeV クラスの放射光源加速器を用いることで MeV–GeV 領域の高エネルギー X 線を発生することができ、また、エネルギーが数 10 MeV の線形加速器を用いることで数 10 keV の硬 X 線を発生することが可能である。エネルギー MeV 以上の X 線には、分光器が使用できないためにエネルギー可変かつ準単色のガンマ線を発生できる現在唯一の方法が LCS である。

LCS-X 線の偏光はレーザーの偏光を保存するため、直線偏光及び円偏光の X 線を発生することが可能である。さらに、LCS-X 線の発散角は電子ビームのローレンツ因子に反比例するため、電子ビームのエネルギーが高いほど指向性の高い LCS-X 線を発生することができる。

### 3.2 LCS を用いた硬 X 線源開発の意義と実用例

LCS を用いて、エネルギー数 10 keV の硬 X 線の発生が可能であることはすでに述べたが、超高品質な硬 X 線は放射光施設において供給可能になっている。そのような現状の中、LCS を用いて硬 X 線源を開発する意義としては、やはり放射光源加速器よりも 2 桁以上低いエネルギーの電子ビームを用いて放射光と同程度のエネルギーをもつ X 線を発生できることであろう。低エネルギーの電子を用いるということは、つまり装置の小型化に大きく貢献するということである。実際に、S バンド小型リニアックは約 100 m<sup>2</sup> の装置規模であり、大病院や大学、工場生産ライン等に設置可能な大きさである。

また、LCS-X 線を X 線管球と比べると、LCS-X 線の方がエネルギー拡がり小さくおかつそのエネルギーを連続的に変えられることが大きな利点である。X 線管球は、制動放射 X 線と特性 X 線が混在したエネルギー分布をしているため、準単色の X 線を得ることは困難である。LCS-X 線の準単色性は、医療従事者の被曝量低減やイメージング画像のコントラスト向上に寄与する。

LCS-硬 X 線源の実用化を達成するためには、まずは現状の大きな問題点である圧倒的な強度の低さを改善しなければならない。現状 S バンド小型リニアックで発生可能な硬 X 線の光子数は、全立体角で 10<sup>7</sup> photons/s が最大である (Table 2 参照)。このためイメージングプレートを用いて鮮明な 1 画像を取得するのに 30 分程度かかり、真に実用的な LCS-硬 X 線源

を達成するためには、5 桁程度以上の X 線の強度の向上が必要である。LCS-X 線の光子数を劇的に上げる技術開発が、国内外で行われている。光子数を上げるためには、高い電流量の電子ビームと高いパワーのレーザーを小さいビームサイズに収束し高繰り返しで正面衝突させることが重要である。電子ビームの電流量を上げる方法として、小型の蓄積リングや超伝導加速技術が開発されており、衝突回数を増やすためのマルチバンチ加速等も試みられている。また、ハイパワーレーザーを電子ビームと衝突させるために、衝突点近傍に 2 枚または 4 枚の光共振器を導入する方法が開発されている<sup>13,14)</sup>。

Table 2. Parameters of LCS hard X-rays.

|                 |                                                |
|-----------------|------------------------------------------------|
| Collision angle | 15 degree<br>( Head-on collision is 0 degree ) |
| Maximum energy  | 10 keV–40 keV                                  |
| Energy spread   | < 10 %                                         |
| Intensity       | 10 <sup>7</sup> photons/s                      |

アメリカの Lyncean Technologies 社<sup>15)</sup> では、小型の電子蓄積リングにレーザー共振器を合わせた LCS-硬 X 線源を販売し、すでに 1 台以上の販売実績がある。この LCS-硬 X 線源は、Compact Light Source<sup>16,17)</sup> とよばれ、長さ 5 m の線形加速器で加速した電子ビームを周長わずか数 m の蓄積リングに周回させて、光共振器に蓄積したレーザーと衝突させて発生させる。光共振器は 4 枚のミラーで構成され、レーザーパワーは 50 kW にも達する。電子ビームのエネルギーは 20 MeV–45 MeV の間で変えることができるため、LCS-硬 X 線のエネルギーは 15 keV–36 keV で変にすることができる。LCS-硬 X 線のエネルギー拡がり は 3 % でその光子数は 10<sup>10</sup> photons/s 以上に達する。この装置を用いて、X 線回折<sup>18)</sup> や X 線 CT<sup>17)</sup> への利用が実際に行われている。

国内においても 10<sup>12</sup> photons/s 以上の LCS-X 線源の開発を目標とした研究開発が行われている。これは、文部科学省の「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」の一つである「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発<sup>19)</sup>」として、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が委託機関として実施しているプロジェクトである。産総研もこのプロジェクトの再委託機関として参画している。この基盤技術開発では、1 MW の蓄積が可能なレーザー光共



振器の開発や、超伝導加速技術及び軽元素への感度が高いタルボ干渉計を用いた位相イメージング法の開発などが行われている。

### 3.3 S バンド小型リニアックの LCS-X 線源

Table 2 に産総研 S バンド小型リニアックで発生可能な LCS-硬 X 線のパラメータを示す。電子ビームのエネルギーを可変にすることで、最大エネルギー 10 keV から 40 keV までの X 線を発生することができる。

### 3.4 X 線の位相イメージング

本項では、S バンド小型リニアックの LCS-硬 X 線を用いて行っている位相イメージングの内容について述べる。位相イメージングに関する詳しい解説は参考文献<sup>20,21)</sup>に掲載されている。

X 線が物質を透過する際には、X 線の減衰と位相シフトが生じる。減衰量から投影像を得る方法は吸収イメージングとよばれ、位相シフト量の投影像を得る方法が位相イメージングとよばれる。

従来のレントゲン撮影などに利用される吸収イメージングでは、X 線減衰量の差からコントラストが得られるため、重元素ほど高いコントラストが得られる。一方で、軽元素から成る生体軟組織に対しては明瞭なコントラストが得られにくい。しかし、位相情報から画像を形成すると軽元素に対しても明瞭なコントラストが得られる。これは、硬 X 線領域において X 線吸収の相互作用断面積に対して X 線の位相シフトの相互作用断面積が約 1000 倍大きいことに由来する<sup>20)</sup>。

X 線の吸収量は高感度な 2 次元検出器を用いれば測定できるが、X 線の位相シフトを直接検出する検出器は存在しない。そこで、位相シフトを強度に変換して測定することが行われている。数種類の位相測定方法があるが、ここでは S バンド小型リニアックで実際に行っている屈折コントラスト法とタルボ干渉法について以下に述べる。

#### 3.4.1 屈折コントラスト法

焦点サイズの小さい LCS-X 線源は比較的良好な空間コヒーレンスを有するため、物質の境界において屈折された X 線が元の光軸からずれて他の X 線と干渉する効果が現れる。つまり屈折率の異なる物質の輪郭部分が強調されてコントラストが向上する。これを LCS-硬 X 線を用いて実証した結果が Fig. 2 である<sup>2)</sup>。LCS-硬 X 線のエネルギーは 30 keV、焦点サイズは 40  $\mu\text{m}$  である。測定サンプルにはラットの腰椎を使用し、X 線の検出にはイメージングプレートを利用し

ている。サンプルからイメージングプレートまでの距離を 40 mm から 750 mm の範囲で変えながら測定し、サンプルからの距離が遠くなることで輪郭が強調されていることが分かる。また、焦点サイズ 5  $\mu\text{m}$ 、管電圧 80 kV のマイクロフォーカス X 線源で測定した結果と比較すると、LCS-X 線源の方がコントラストが約 2 倍高いという結果が得られている。

#### 3.4.2 タルボ干渉法

タルボ干渉計は、2 枚の透過格子がサンプルと検出器の間に設置され、X 線の位相変化を検出して画像化する<sup>21)</sup>。タルボ干渉計を用いた位相イメージングは、東北大学百生教授らの研究によって X 線管球と X 線透過格子で構築したタルボ干渉計を用いてすでに実用的なものが開発されている。実際に、病院で関節リウマチ診断装置が稼働している<sup>22)</sup>。このタルボ干渉計に LCS-X 線を応用すると、その準単色性から X 線管球の場合に比べて高画質の画像が得られると期待される。現在までに S バンド小型リニアックの LCS-硬 X 線源を用いた予備実験を行い、タルボ干渉計の位相イメージングに重要なモアレ縞を測定することに成功している。

## 4 コヒーレントテラヘルツ波源の開発

産総研の S バンド小型リニアックで行っている 2 つ目の光源開発であるテラヘルツ波の発生方法と応用研究について述べる。第 4.1 項ではテラヘルツ波の特徴、第 4.2 項では、超短パルス電子ビームを用いたテラヘルツ帯のコヒーレント放射の発生について述べ、第 4.3 項では、コヒーレントシンクロトロン放射を利用したテラヘルツ波イメージングの内容について述べる。最後の第 4.4 項では、コヒーレント遷移放射の偏光分布の測定結果について説明する。

### 4.1 テラヘルツ波について

テラヘルツ波は、周波数 0.1 THz から 10 THz の範囲の電磁波の事を指し、電波と遠赤外線の境界に位置する。テラヘルツ波は、20 年前まで未踏領域の電磁波とよばれ発生と測定どちらも困難であったが、近年それらの技術が急速に発展してきている。

テラヘルツ波の主な特徴を以下に挙げる。

- 電波のように物質に対する透過性能を有し、厚さ 1 cm 程度の紙やプラスチックは透過する。しかし、水に対する吸収は大きい。
- 光のようにミラーやレンズを用いて反射、集光

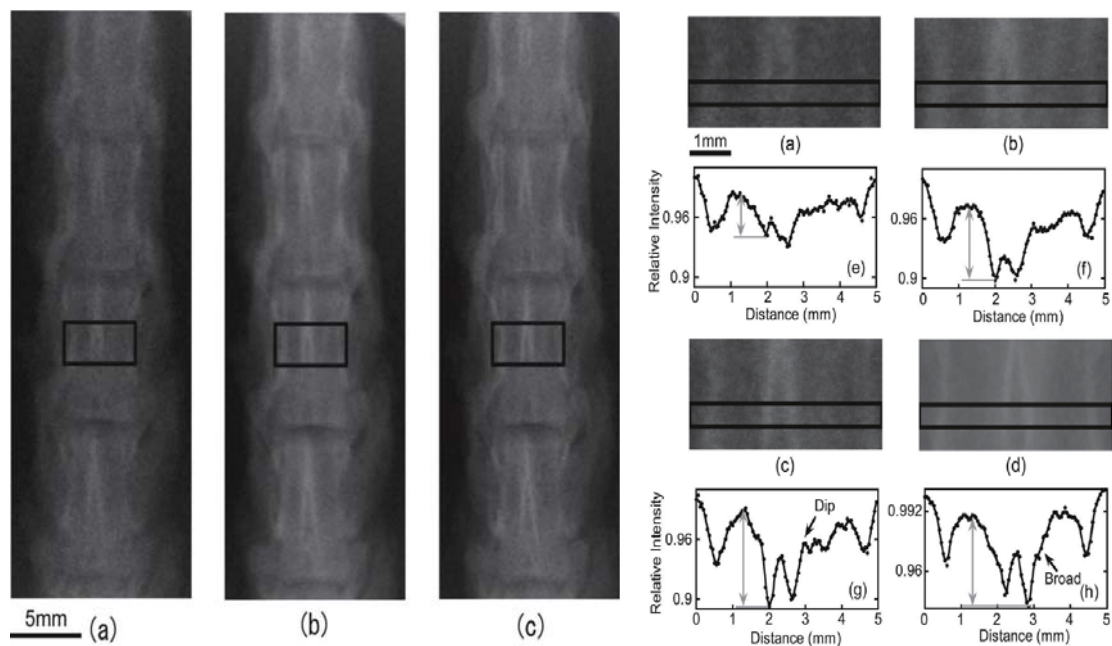


Figure 2. Left: Transmission image of rat lumbar vertebrae. The energy of LCS X-rays was 30 keV. The distance between the rat lumbar vertebrae and an imaging plate was (a): 40 mm, (b): 200 mm, and (c): 750 mm, respectively. Right (a)–(c): Enlarged images taken from the areas marked by rectangles in Figs. 2(a)–(c). (e)–(g): Integrated line profiles over a selected area marked by a rectangle including ten lines in (a)–(c). (d) and (h): Transmission image measured with a conventional microfocus tube and Integrated line profile. Quotation from Ref. 2.

することができる。

- テラヘルツ帯が分子の回転及び振動の周波数に相当するため多くの物資に固有の指紋スペクトルが存在する。

水に対する吸収が大きいため、テラヘルツ波のパワーが低いと大気中を伝送する際に吸収されて測定が困難になる。そのため、窒素雰囲気中で測定することが一般的に行われている。上記の特徴を活かした様々な応用法が提唱され、郵便物内部に隠匿された違法薬物や危険物探知などのホームランドセキュリティー応用から食品内部の異物検査、医薬品の品質検査、皮膚がん診断、大容量通信など、より身近な分野への応用まで多岐にわたる。

テラヘルツ波を発生する方法には、電子加速器を用いる方法やフェムト秒レーザーを用いる方法等がある。電子加速器を用いたテラヘルツ波発生では、自由電子レーザーによる方法が開発されているが、S バンド小型リニアックでは、後述するように超短パルス電子ビームからコヒーレント放射によってテラヘルツ波を発生している。このテラヘルツ波には、ピークパ

ワーが高いという特徴がある。それに対し、フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波源は、10 年ほど前まではその出力は低かったが最近の技術開発によって、パルスエネルギー 3  $\mu\text{J}$ 、ピークパワー  $\sim 30 \text{ MW}$ 、平均パワー 3 mW の発生も可能になってきている<sup>23)</sup>。

S バンド小型リニアックに限らず、超短パルス電子ビームを用いてコヒーレント放射の研究が盛んに行われている理由として、テラヘルツ応用だけでなく、電子ビーム診断に応用できる点が挙げられる。電子ビームのエネルギーやバンチ長、サイズ、発散角によってコヒーレント放射の空間分布やスペクトル、パワーが決まるため、それらを精密に測定することで電子ビームのエネルギー、バンチ長、サイズ、発散角、位置を非破壊で測定することができる。

#### 4.2 テラヘルツ帯におけるコヒーレント放射の発生

超短パルス電子ビームからテラヘルツ波が発生する原理について説明する。個々の電子から発生する放射の波長に対してバンチ長が十分に短い場合、それぞれの放射が互いに干渉し、コヒーレント放射となる。特

に, 電子バンチがサブピコ秒の超短パルスである時, テラヘルツ帯の電磁波が干渉する. コヒーレント放射の全エネルギー  $W$  は以下のように記述される<sup>24)</sup>.

$$\frac{d^2 W}{d\omega d\Omega} = N\{1 + (N-1)f(\omega)\} \frac{d^2 W_1}{d\omega d\Omega} \quad (1)$$

ここで,  $\omega$  はコヒーレント放射の角周波数,  $\Omega$  は立体角,  $N$  は電子バンチ内の電子数,  $W_1$  は一つの電子からの放射エネルギー,  $f(\omega)$  はフォームファクターとよばれ,

$$f(\omega) = \exp(-\sigma^2 \omega^2) \quad (2)$$

と表記される.  $\sigma$  は電子ビームバンチ長 (rms) である. ここで, enhancement factor を  $1 + (N-1)f(\omega)$  と定義して図示すると Fig. 3 のようになる. 放射の波長がバンチ長に比べて短い場合, フォームファクターは 0 になり, 逆の場合は 1 になるため電子ビームのバンチ長が短いほど高い周波数までのテラヘルツ波が発生する. フォームファクターが 1 の場合, 放射エネルギーは電子数の二乗に比例する. 電子バンチ内の電子数は  $10^{10}$  にも達するため, インコヒーレント放射に対して高出力なコヒーレント放射を発生することができる.

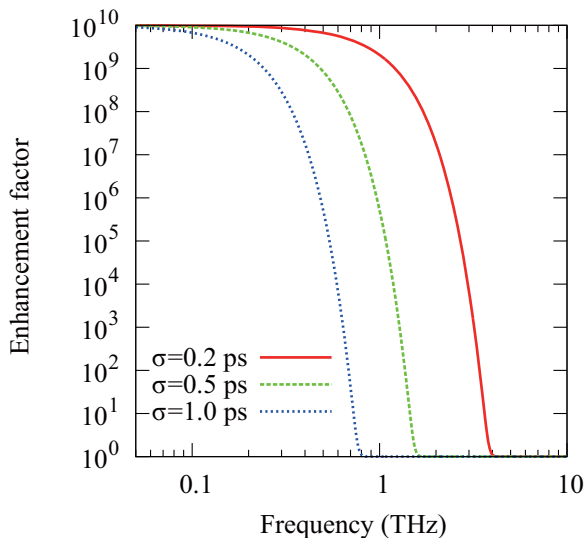


Figure 3. Frequency spectra of enhancement factor depending on the bunch length (rms).

電子ビームから放射を発生させる具体的な方法としては, 電子ビームが誘電率の異なる媒質の境界またはその近傍を通過するときに発生する遷移放射および回折放射, 磁場中を通過するときに接線方向に放射されるシンクロトロン放射, 周期的な構造の極近傍を通

過するときに放射されるスミスパーセル放射などがある.

#### 4.3 コヒーレントシンクロトロン放射を用いた透過イメージング

コヒーレントシンクロトロン放射を用いたテラヘルツイメージングについて述べる. 詳しい実験のセットアップは, 参考文献<sup>6,7)</sup>を参考にして頂きたい. このテラヘルツイメージングでは, サンプルにテラヘルツ波を照射してサンプルを透過したテラヘルツ波の 2 次元電力分布を測定する. 電力測定には中心周波数 0.1 THz の検波器を使用している. その検出領域が  $1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  であるため, サンプルを 2 次元的に走査することでテラヘルツ波の透過電力分布が測定できる. Figure 4 に大きさ 50 mm の野菜を測定した時のテラヘルツ波の透過電力分布を示す. 図中の色が赤いほどテラヘルツ波が透過し, 青いほど透過しにくいことを示している. 野菜の輪郭を明瞭に測定することができている. これは, 水に対するテラヘルツ波の吸収が大きいことを反映していて, 葉脈部分の吸収が特に大きいことも分かる. さらに, 14 時間後にはテラヘルツ波が透過しやすくなり, 野菜の水分が失われていることも捉えることができている. テラヘルツ波を用いることで食品の品質管理 (特に鮮度) に応用できることを示した結果である.

#### 4.4 コヒーレント遷移放射の偏光分布測定

コヒーレント遷移放射の偏光は, 放射状の偏光分布をもつラジアル偏光をしている. ラジアル偏光ビームには, 強収束したときのフォーカスサイズを小さくできるという特徴があり, 可視光領域ではすでに実証されている<sup>25)</sup>. テラヘルツ波は, mm から sub-mm の波長であるためにそのイメージングの分解能が低いという問題がある. しかし, ラジアル偏光テラヘルツ波をイメージングに応用すると, そのフォーカスサイズが直線偏光テラヘルツ波のフォーカスサイズよりも小さくすることができるため, イメージング分解能の向上に寄与する. 本項では, ラジアル偏光テラヘルツ波を発生するために利用している遷移放射について述べ, その偏光状態を測定した結果について説明する.

##### 4.4.1 遷移放射

遷移放射 (transition radiation) は, 誘電率の異なる境界を電子ビームが通過する際に放射される. 誘電率が異なるために電子ビームの電場が変化し, この過程において遷移放射が放出される. 電子ビームが厚さの



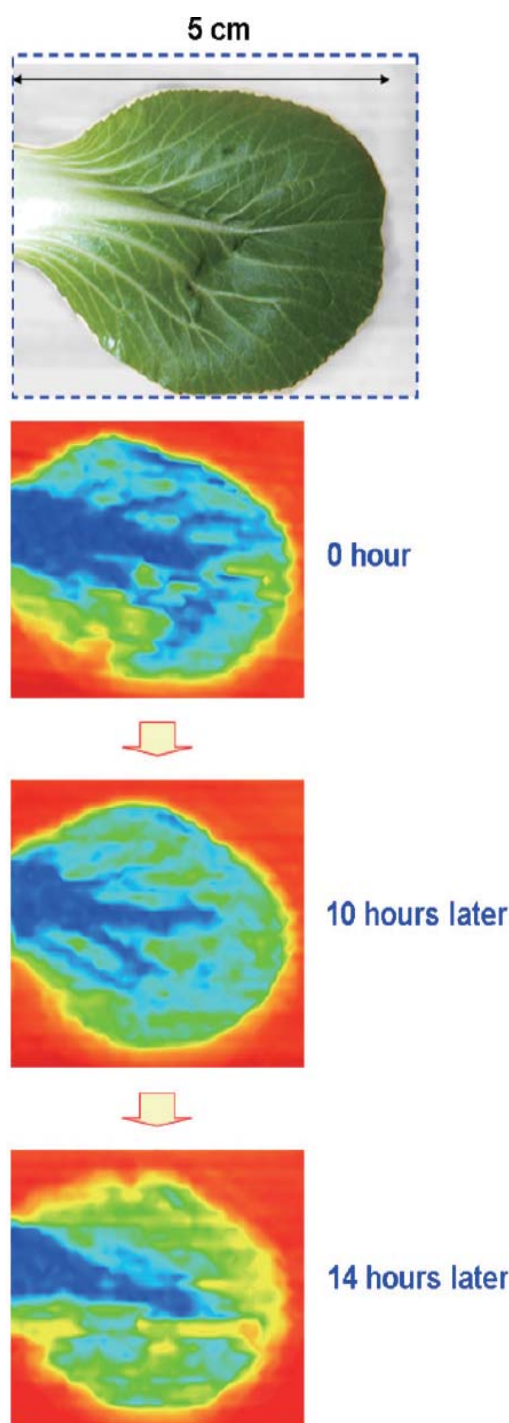


Figure 4. Two-dimensional distribution of the transmitted power of terahertz radiation for a vegetable leaf and its time variation. Quotation from Ref. 7.

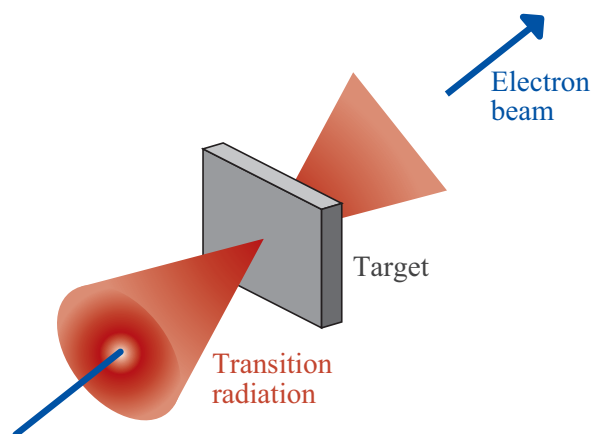


Figure 5. Directions of the transition radiation when the electron beam passes through a dielectric target.

薄い誘電体ターゲットを通過するときには異なる 2 方向に遷移放射が放出される。例えば, Fig. 5 に示すように, 電子ビームが誘電体面に対して垂直に通過する場合, 電子ビームの進行方向とそれに対して 180 度反対方向に遷移放射が発生する。なぜ 2 つの方向に発生するかというと, 前方方向の遷移放射は入射する電子ビーム起因の放射であり, 後方方向の放射は, 誘電率の異なる境界面を鏡に見立てた時の鏡像電子起因の放射と解釈することができる。したがって, 誘電体面を電子ビームの進行方向に対して 45 度傾けた場合は, 鏡像電子は電子ビームの進行方向に対して直角に進行するように見えるため, 遷移放射の放出方向は電子ビームの進行方向とそれに対して 90 度方向に放出される。この現象は, 電子加速器の真空ダクトからコヒーレントテラヘルツ波を取り出す際に非常に役に立つ。

電子ビームが完全導体と真空の境界を通過するとき前方方向に放出される遷移放射のエネルギーは以下の式で記述される<sup>26)</sup>。

$$\frac{d^2 W_1^{\text{TR}}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2 \sin^2 \theta}{\pi^2 c (1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (3)$$

ここで,  $e$  は素電荷,  $\beta$  は電子ビームの速度と光速の比,  $\theta$  は遷移放射の放出角度,  $c$  は光速である。式 (3) から計算される遷移放射の角度分布は, 中心近傍 ( $\theta = 0$ ) の放射エネルギーは 0 で  $\theta = 1/\gamma$  ( $\gamma$  は電子ビームのローレンツ因子) 付近にピークをもつ円環状の角度分布になる。

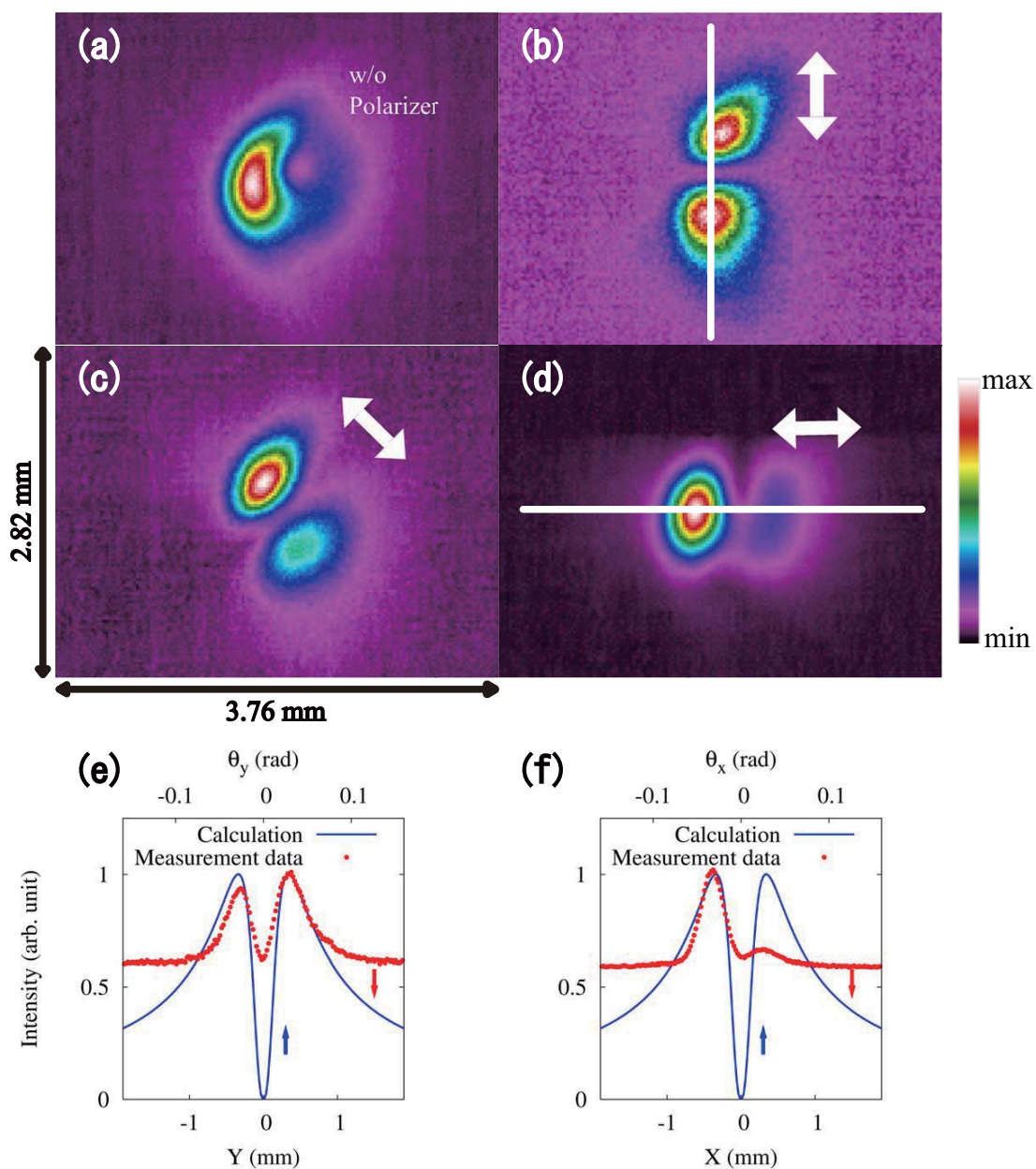


Figure 6. Intensity distribution images of radially polarized CTR measured with the terahertz camera, without the polarizer (a), with the polarizer rotated 0 degree (b), 45 degree (c), and 90 degree (d). The arrows in (b), (c), and (d) express the polarization direction. (e) and (f): The line intensity distributions given in (b) and (d), respectively. The red points are measured data and the blue solid curves are calculated values derived from Eq. (3). Quotation from Ref. 8.



## 4.4.2 コヒーレント遷移放射の偏光分布測定

コヒーレント遷移放射の偏光状態を測定するため、ワイヤーグリッドの偏光子とテラヘルツ波の 2 次元プロファイルを測定できるテラヘルツカメラ (IRV-T0831) を用いた。偏光子は、グリッド方向に対して垂直な偏光成分のみを透過する。したがって、偏光状態が放射状でその 2 次元分布が円環状であるコヒーレント遷移放射を測定する時には、双極子放射のようなプロファイルが偏光子の角度に応じて中心軸の周りを回転するように見える。

詳しい実験のセットアップは参考文献<sup>8)</sup>を参考にし、ここでは概要だけ述べる。遷移放射を発生するためのターゲットは、厚さ 50  $\mu\text{m}$ 、大きさ 400  $\text{mm}^2$  のアルミナを用いた。電子ビームの進行方向に対してアルミナ面は垂直になるように設置し、電子ビーム進行方向と同じ方向に放出される遷移放射を軸外し放物面鏡で 90 度方向に反射して大気中に取り出した。それを最終的にレンズを用いてテラヘルツカメラまで導入している。軸外し放物面鏡の中心には直径 10 mm の貫通穴が開いており、電子ビームはその穴を通過する。

Figure 6 にテラヘルツカメラで測定したコヒーレント遷移放射の 2 次元強度分布を示す。この図は、参考文献<sup>8)</sup>から引用している。この参考文献のオンライン版<sup>27)</sup>には偏光子を連続的に回転したときの 2 次元分布をビデオデータにしているのでご興味のある方は是非ご覧になって頂きたい。Figure 6 より、予想していた通りに偏光方向に沿った方向でのみテラヘルツ波が観測された。これはコヒーレント遷移放射で発生したテラヘルツ波がラジアル偏光であることの直接的な証拠である。しかし、Fig. 6(a)にあるように、コヒーレント遷移放射のプロファイルはきれいな円環ではない。この原因は、テラヘルツ波の伝送に利用した軸外し放物面鏡に開けた穴の影響であると考えられる。穴の直径は 10 mm なのに対し、放物面鏡に投影したコヒーレント遷移放射の円環の直径は 14 mm である。つまり、両方とも同じくらいの大きさであるため、穴の中心軸と電子ビームの進行方向の軸が僅かにずれると、それに伴ってコヒーレント遷移放射の一部が放物面鏡で反射されずに伝送され、その効果がテラヘルツカメラで観測されたと考えられる。事実、軸外し放物面鏡を使用せずに、コヒーレント遷移放射を測定した場合は、その 2 次元強度分布が綺麗な円環になることが観測されている。

## 5 まとめ

産総研 S バンド小型リニアックの装置概要とレーザーコンプトン散乱硬 X 線源、テラヘルツ波源の開発と応用研究について述べた。

レーザーコンプトン散乱は、実験室規模の装置でエネルギー可変かつ準単色の硬 X 線を発生でき、産総研ではタルボ干渉計を用いた位相イメージングなど医用イメージングへの実用化を目指した技術開発を行っている。強度が非常に低いというのが現状の大きな問題点であるが、国内外でレーザー光共振器など強度向上のための技術開発が行われており、今後の技術革新に期待する。

テラヘルツ波に関しては、未踏領域とよばれていたテラヘルツ波を超短パルス電子ビームのコヒーレント放射によって発生し、イメージング手法などの開発を行っている。また、ラジアル偏光といった特徴的な偏光をもつテラヘルツ波の発生が可能であり、偏光イメージングや偏光状態の解析による電子ビームの非破壊診断の応用も行っている。

S バンド小型リニアックの運転及び維持管理は、筆者の所属するグループの豊川氏、安本氏、田中氏、清氏、小川氏、池浦氏、産総研関係者のご尽力によって成り立っています。深く感謝致します。また、電子加速器及び Ti:Sa レーザーの運転に関して早稲田大学の坂上氏の多大なご協力にも感謝します。タルボ干渉計による位相イメージングは、東北大学の百生教授と Margie Olbinado さんのご協力の下、実施しています。

## 参考文献

- 1) 黒田隆之助, 豊川弘之, 安本正人, 池浦広美, 小池正記, 山田家和勝, 加速器, 5 (2008) 137.
- 2) H. Ikeura-Sekiguchi, R. Kuroda, M. Yasumoto, H. Toyokawa, M. Koike, K. Yamada, F. Sakai, K. Mori, K. Maruyama, H. Oka, T. Kimata, Appl. Phys. Lett., 92 (2008) 131107.
- 3) K. Yamada, R. Kuroda, H. Toyakawa, H. Ikeura-Sekiguchi, M. Yasumoto, M. Koike, F. Sakai, K. Mori, H. Mori, N. Fukuyama, E. Sato, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 608 (2009) S7.
- 4) N. Sei, R. Kuroda, M. Yasumoto, H. Toyokawa, H. Ogawa, M. Koike, K. Yamada, J. Appl. Phys., 104 (2008) 114908.
- 5) R. Kuroda, N. Sei, T. Oka, M. Yasumoto, H.

- Toyokawa, H. Ogawa, M. Koike, K. Yamada, F. Sakai, *Radiat. Phys. Chem.*, 77 (2008) 1131.
- 6) R. Kuroda, M. Yasumoto, N. Sei, H. Toyokawa, H. Ikeura-Sekiguchi, H. Ogawa, M. Koike, K. Yamada, *Radiat. Phys. Chem.*, 78 (2009) 1102.
- 7) R. Kuroda, M. Yasumoto, H. Toyokawa, N. Sei, M. Koike, K. Yamada, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.*, 637 (2011) S30.
- 8) Y. Taira, R. Kuroda, M. Kumaki, M. Tanaka, H. Toyokawa, H. Tomizawa, *Vib. Spectrosc.*, 75 (2014) 162.
- 9) E. Feenberg, H. Primakoff, *Phys. Rev.*, 73 (1948) 449.
- 10) F. R. Arutyunian, V. A. Tumanian, *Phys. Lett.*, 4 (1963) 176.
- 11) R. H. Milburn, *Phys. Rev. Lett.*, 10 (1963) 75.
- 12) O. F. Kulikov, Y. Y. Telnov, E. I. Filippov, M. N. Yaki-menko, *Phys. Lett.*, 13 (1964) 344.
- 13) J. Bonis, R. Chiche, R. Cizeron, M. Cohen, E. Cormier, P. Cornebise, N. Delerue, R. Flaminio, D. Jehanno, F. Labaye, M. Lacroix, R. Marie, B. Mercier, C. Michel, Y. Peinaud, L. Pinard, C. Prevost, V. Soskov, A. Variola, F. Zomer, *J. Instrum.*, 7 (2012) P01017.
- 14) T. Akagi, S. Araki, Y. Funahashi, Y. Honda, H. Kataoka, T. Kon, S. Miyoshi, T. Okugi, T. Omori, K. Sakaue, H. Shimizu, T. Takahashi, R. Tanaka, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Washio, H. Yoshitama, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.*, 724 (2013) 63.
- 15) <http://www.lynceantech.com/>
- 16) S. Schlee, F. G. Meinel, M. Becha, J. Herzen, K. Achterhold, G. Potdevin, A. Malecki, S. Adam-Neumair, S. F. Thieme, F. Bamberg, K. Nikolaou, A. Bohla, A. O. Yildirim, R. Loewen, M. Gifford, R. Ruth, O. Eickelberg, M. Reiser, F. Pfeiffer, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2012 Oct 16.
- 17) K. Achterhold, M. Bech, S. Schlee, G. Potdevin, R. Ruth, R. Loewen, F. Pfeiffer, *Sci. Rep.*, 3 (2013) 1313.
- 18) J. Abendroth, M. S. McCormick, T. E. Edwards, B. Staker, R. Loewen, M. Gifford, J. Rifkin, C. Mayer, W. Guo, Y. Zhang, P. Myler, A. Kelley, E. Analau, S. N. Hewitt, A. J. Napuli, P. Kuhn, R. D. Ruth, L. J. Stewart, *J. Struc. Func. Gen.*, 11 (2010) 91.
- 19) <http://nkocbeam.kek.jp/index.html>
- 20) 百生敦, *放射光*, 10 (1997) 273.
- 21) 百生敦, *Isotope News*, 705 (2013) 8.
- 22) A. Momose, W. Yashiro, K. Kido, J. Kiyohara, C. Makifuchi, T. Ito, S. Nagatsuka, C. Honda, D. Noda, T. Hattori, T. Endo, M. Nagashima, J. Tanaka, *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.*, 372 (2014) 20130023.
- 23) H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, K. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.*, 98 (2011) 091106.
- 24) G. L. Carr, M. C. Martin, W. R. McKinney, K. Jordan, G. R. Neil, G. P. Williams, *Nature*, 420 (2002) 153.
- 25) R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs, *Phys. Rev. Lett.*, 91 (2003) 233901-1.
- 26) M. L. Ter-Mikaekian, *High-Energy Electromagnetic Processes in Condensed Media*, Wiley-Interscience, New York, 1972.
- 27) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924203114001325/>

## 著 者 略 歴

平 義隆：2012年名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2012年–現在, 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 研究員。小型電子ビーム源の開発及び超短パルス電子ビーム源を用いた新規量子ビーム源の開発とその計測技術開発を行っている。

黒田 隆之助：2004年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。現在, 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 主任研究員。超短パルス電子ビーム源, X線・テラヘルツ光源開発とその産業利用に向けた応用技術開発を行っている。