

# 電子加速器を利用した研究の産業技術への橋渡し

## — レーザーコンプトン光子ビームの発生と非破壊検査への応用 —

豊川 弘之

原子核の研究等に用いられているレーザーコンプトン光子ビームを非破壊検査技術に応用し、透過力の強い産業用ラジオグラフィ技術の実証研究を行った。大型加速器の利用研究・維持管理等を行いながら新しい研究を立ち上げた経過を整理し、要素技術の開発と高度化に始まり、ユーザー利用研究の推進、研究成果の検証、そして新たな研究の方向性を定めて、それに向かって進んでいく過程について、技術的な説明を交えて解説した。研究実施例を基に、橋渡し研究の方法論を抽出することを試みた。

**キーワード:** 電子加速器、レーザー、放射線、ラジオグラフィ、非破壊検査

## Application of laser Compton photon beam to nondestructive tests

– A spin-off technology from nuclear physics –

Hiroyuki TOYOKAWA

Laser Compton photon beams generated by a high-energy electron storage ring have energy in the gamma-ray range. X-ray radiography for industrial products using the laser Compton photon beam is expected to show good spatial and density resolutions, because of its monochromaticity and good beam property. A radiography and computerized tomography system was built using AIST's TERAS electron storage ring. The performance of the system was examined. A summary of the development process is outlined, which includes the processes of market survey and target setting, scenario planning, and integration of technologies. In conclusion, a general methodology for the translational research was discussed.

**Keywords:** Electron accelerator, laser, radiation, radiography, nondestructive inspection

### 1 はじめに

科学技術には研究機関の基礎研究成果を、企業活動へたく強く結びつけることが要求される場合がある。いわゆる「橋渡し研究」である。橋渡し研究とは、自分の拘りや考え方を整理して社会に受け入れられる姿に徐々に近づけていく作業である。成果を急ぐあまり安易に妥協して周囲に迎合すると研究レベルが下がってしまうし、自分のやり方に拘り過ぎると社会から離れてしまう。繊細で忍耐強い擦り合わせ作業が必要である。さらに、タイムリミットもある。研究活動には多くの要因があり、これらのバランスを取ることで研究は成長し、成果はさまざまな形態で拡散し人々に利用される。

この論文は、新たなコンセプトの産業用ラジオグラフィ装置を社会へ提案すること、そして広く公開利用に供することで産業技術としての価値を見極めることを目的としている。研究としては装置の性能向上やチャンピオンデータを出すことが目的ではなく、ユーザーの声を聴くことでマーケティング

グを行い、適切な形で研究成果を社会に橋渡しすることを目的とした。さらには、将来の研究につながるスピノフ技術の育成や調査も行う。

この研究は以下のシナリオによって構成される。

- ①要素技術の開発と高度化: 要素技術を開発して原理実証を行う。
- ②ユーザー利用研究の推進: 装置のユーティリティーを高度化してユーザー利用を推進する。ユーザーの声を多く聴き、研究の方向性を微調整する。
- ③研究成果の検証: 得られた成果は当初の予想どおりであったか、予想外であるなら何を見落としていたか、他にもっと良い方法はないか等を、ユーザーの声を聴きながら客観的に理解し、当初の研究構想を検証する。
- ④研究方向性の決定: 今後の装置や技術開発の要点を整理する。研究を進めるかどうか、費用対効果や所属組織の諸事情を加味して判断する。判断結果にしたがって速やかに行動する。

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

Research Institute of Instrumentation Frontier, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: h.toyokawa@aist.go.jp

Original manuscript received September 15, 2014, Revisions received December 27, 2014, Accepted January 19, 2015

この論文は4章から構成される。第2章では、学術的背景と装置開発の過程、研究成果について述べる。第3章は上記①～③に対応し、橋渡しに向けた技術課題の選択と統合過程を述べる。第4章は④に対応し、要素技術の選択と統合の過程を振り返り、目標達成に向けた取り組みと得られた結果について考察する。

## 2 学術的背景と装置開発の過程

原子核や素粒子物理学の計測技術は高度に洗練されており、産業技術に応用できるケースがある。そこで、原子や原子核反応の相互作用断面積を測定する手法を産業用ラジオグラフィを用いた非破壊検査へ応用することを試みた。具体的には電子加速器を用いて高エネルギー光子ビームを安定して発生する技術とラジオグラフィ技術を開発し、さらに Computerized Tomography(CT) を用いることで、従来にない高い空間分解能と密度分解能を持つ非破壊検査システムを開発するものである。

光子とは量子化された電磁波の呼称であり、この論文では X 線あるいはガンマ線を意味する。ラジオグラフィ (Radiography) とは放射線を用いた撮影方法であり、いわゆるレントゲン撮影や X 線 CT による断層撮影等が含まれる。産業用ラジオグラフィは自動車、航空機やロケット、焼結材料や鋳物、電子基板等多くの工業製品の開発において、製品の信頼性を高めることに役立っている<sup>[1]</sup>。我々の生活をより安全、快適なものにするための基盤技術である。大型の産業用 CT 装置には高エネルギー光子が必要であり、エネルギー数 MeV の電子加速器が用いられる。エンジンブロックを丸ごと空間分解能 2～3 mm で撮影できる性能を持った装置も開発されている。

インフラ診断において、最近では可搬型の電子加速器を使って橋梁検査を現地で行う技術が開発されている<sup>[2]</sup>。コンクリート内部の鉄筋や、その周辺に発生するき裂などを非破壊で高精細に可視化する手法は社会で根強く求められている。化学プラントの配管や木材内部の非破壊可視化等のニーズもある。産業界では高エネルギー光子を用いた非破壊検査用ラジオグラフィの需要は非常に多い。

この研究では電子蓄積リングを用いたレーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering; LCS)<sup>[3]</sup> という技術を用いている。電子蓄積リングとは円形の電子加速器であり、ドーナツ状の超高真空容器内に磁場を用いて電子を閉じ込め、電場を用いて加速する装置である。著者が用いたのは直径 10 m、周長 30 m の電子蓄積リングであり、中小規模のものである。電子蓄積リングの場合、基本的に電子加速は行わず、電子が周回する際に放射したエネルギーのみを補うことで、電子を安定に長時間蓄積することを目的とし

て設計されている。対照的なのが電子線形加速器であり、これは電子を連続的に加速して、短い区間で電子を効率よく加速するための装置である。

LCS とは、電子加速器を用いて高エネルギー光子を発生させる手法の一つである。高エネルギー電子にレーザーを照射するとコンプトン散乱によってレーザー光子が電子エネルギーの一部を受け取り、X 線やガンマ線領域の電磁波となる。コンプトン散乱とは、光子と電子の衝突であり、双方の粒子の挙動はエネルギーと運動量の保存則による古典力学によって正確に記述される。レーザーコンプトン散乱 (LCS) の場合、電子静止系においては通常のコンプトン散乱と同じように記述できるが、電子のエネルギーが高くほぼ光の速さであるため、実験室系では、レーザー光子が電子によって弾き飛ばされるように見える。LCS における、散乱前後の光子エネルギーと実験室系における散乱角、および電子エネルギーとの関係は式 1 によって記述される。

$$E_{\gamma} = \frac{E_0(1 - \beta \cos \theta_1)}{1 - \beta \cos \theta_2 + E_0 \frac{1 - \cos(\theta_2 - \theta_1)}{E_e}} \quad (式 1)$$

Kinematics は図 1 に示したとおりである。本手法は、電子加速器を用いてレーザーを高エネルギー X 線やガンマ線に変換する一種の波長変換器でもある。産総研では、旧電総研時代の 1985 年より LCS 光子発生基礎研究を開始し、1990 年代後半～2000 年には 1～40 MeV の光子領域の光子ビーム源を整備して利用研究に供してきた実績がある<sup>[4][5]</sup>。高エネルギーかつ指向性の高い光子ビームが得られるため、原子核実験、放射線検出器の応答関数測定、光核反応断面積測定、原子の吸収断面積測定等に用いられている。

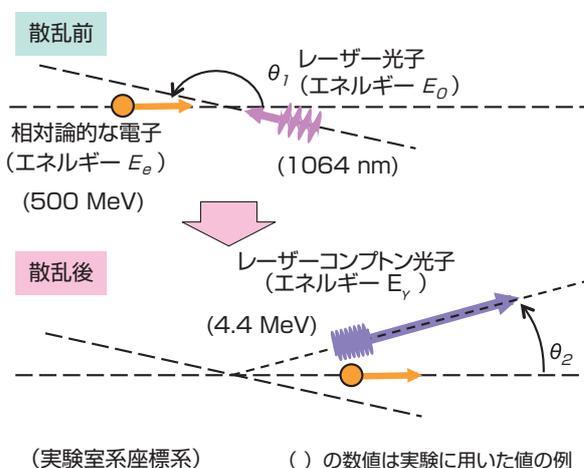


図1 レーザーコンプトン散乱のkinematics。

### 3 技術の選択と統合の過程

#### (1) 要素技術の開発と高度化

工業製品において異物を検査するためには1 mm以下の空間分解能が必要であり、さらに、樹脂中の気泡を可視化するには、線減弱係数<sup>[6]</sup>の絶対値として概ね $10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ 以下の分解能が必要である。物質中を通過する光子束は、通過距離に対して指数的に減衰し、線減弱係数は指数の肩であり長さの逆数の次元を持つ。

X線CTでは光子(X線)の減衰が指数関数で表されると仮定して線減弱係数を画像化している。しかし、線減弱係数は、図2に示すように物質の種類と光子エネルギーの関数である。さらに、一般的に使われているX線CT装置では、さまざまな波長(エネルギー)を含む白色光子が使用されているため、実際には全てのエネルギーの線減弱係数の荷重平均値がCTによって画像化されることとなる。その結果、CT画像には人為構造、すなわちアーチファクトが現れる。

医療用のCTにおいては、主として生体を測定するため、全ての物質を水と等価であると見なすことができる場合が多い。CTで画像化される物理量はCT値と呼ばれ、実際にはX線エネルギースペクトルや検出器の効率等によって決まる指標である。医療分野では水と空気を基準としてCT値を規格化したHounsfield unit (HU)を用いることが一般的である。その場合、CT画像は水の密度分布と見なすことができるため、X線のエネルギー広がりによって発生したアーチファクトを水ファントム等を用いて補正することが可能である。

しかし、産業用非破壊検査においては、さまざまな物質が測定対象であり、それらの密度分布や形状を定量的に評価することが求められるため、基準となるファントムを決定することは難しい。これを解決するには単色光子を用いると良いが、金属等に対して十分な透過力を持つ光子が必要である。そこで、高エネルギー単色光子が必要となる。

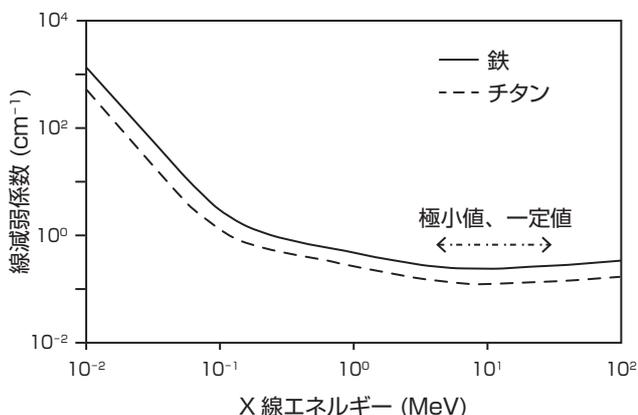


図2 10 keV~100 MeVにおける鉄およびチタンの線減弱係数<sup>[6]</sup>。

図2に示すが、多くの金属の線減弱係数は、光子エネルギー5~20 MeVにおいてあまり変化しないことが分かる。例えば、鉄の線減弱係数は光子エネルギー $10 \pm 3 \text{ MeV}$ において0.6%の変動を示す。この値は1 keVの光子における数eVのエネルギー広がりに対応する。つまり、エネルギー広がりが数10%のMeV領域の光子を用いたCT測定は、keV領域でエネルギー広がりが1%以下の光子CT測定と等価となるため、単色光子と見なすことができる。また、鉄の線減弱係数は、およそ10 MeV付近で最低値となり、他の物質でも概ねMeV領域で最小となる。そのため、MeV領域の光子は物質を最も良く透過する。すなわちMeV領域の光子ビームは、厚い試料を高い密度分解能で検査する最適なツールである。

そこで、この研究では、MeV領域の光子を用いた産業用ラジオグラフィを試作し、密度分解能や空間分解能において高い数値性能を実証し、高精細なCT画像を提示することを目標とした。良いラジオグラフィ装置には、高い空間分解能、密度分解能、時間分解能(計測時間の短さ)が要求される。これらを同時に達成するには、(1)試料をペンシル状の細いビームで小さなピッチでスキャンするか、あるいは微小点から発生したコーン状のビームと小さな画素のカメラを用いた撮影を行うこと、および(2)透過した光子を高効率で検出することが必要である。これらを実現するモデルを図3に示した。(A)は細いビームを用いてスキャンするCTの方法であり、これは第1世代と呼ばれるCT手法である。細いビームに対して試料を併進、上下、回転させることで360度全ての方向からの透過画像を測定し、画像を再構成する。(B)はコーン状のビームに対して、試料の背後にX線カメラ等置いて透過像を一気に測定する手法であり、第3世代と呼ばれるCT手法である。回転動作のみで(A)と同等の測定を行うことができるため、時間分解能に優れている。ただし、(B)の場合は、良い画質を得るためにはX線カメラの素子を小さくすることが

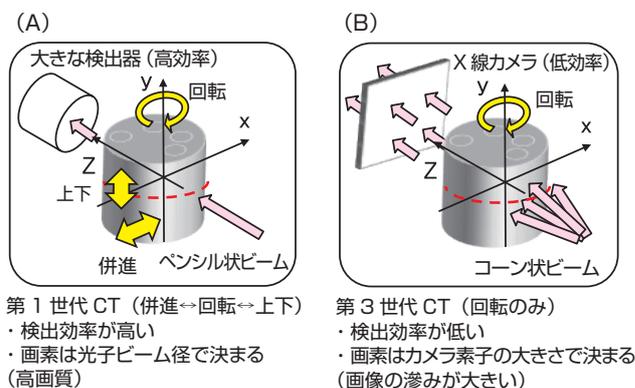


図3 CTにおける世代の説明。(A) 第1世代、(B) 第3世代。

必要であるが、我々が用いる LCS 光子ビームの透過力は非常に高く、厚さ数 cm の鉛を簡単に透過する。そのため X 線カメラ内部で光子が散乱してしまい、第 3 世代 CT を用いて数 cm 以下の空間分解能の画像を得ることは技術的に難しい。

そこで、本研究では第 1 世代 CT システムを構築した。同手法は、細い光子ビームとそれを受ける大きな検出器を対として、その間に試料を置き、光子ビームの減衰量を測定する。この研究で実際に開発した第 1 世代 CT システムの概要を図 4 に示す。

これで、この研究の要素技術は概ね完成したが、次は技術の改良を行いユーティリティを向上し、装置を公開利用に供して本手法の使い勝手をユーザーに評価してもらい、改良点や要求仕様等についてユーザーと協議を重ねることが必要である。高額な装置になるがユーザーはどのような反応を示すか、検査スループットはどの程度必要なのか、将来の発展性はどうか等、さまざまなことを検証するため、実際にシステムをユーザーに開放して、その声を聴くこととした。

## (2) 利用研究の推進

この研究を開始するにあたって自動車産業や原子力産業の企業へヒアリングを行ったが、彼らの要望は少なくとも空

間分解能として 1 mm 以下であること、焼結材料の密度として 1 % 程度の密度ムラを検知できること等であった。本ラジオグラフィシステムを用いて工業製品の透過像を測定した結果を図 5 (左) に示す。研究開発初期に行った金属ボルトの撮影実験では、原理実証には成功したが満足する画質が得られなかった。

そこで、性能向上のためにさまざまな改良を行った<sup>[7]</sup>。例えば、コリメータの配置精度やアライメント方法の改良、モニタ機器の高度化によるレーザーと電子ビームの時間・空間的な衝突精度の向上、コリメータや検出器の寸法等の最適化、電子加速器の制御系改良による LCS 光子ビーム強度の増強と安定化等である。また、検査にかかる費用対効果を最大にするには、システム全体を効率よく運転できるようにすることが、実は非常に重要である。そこで、電子蓄積リングおよび入射器に用いる電子線形加速器の制御・モニタ系の整備と改良を行った。ビームモニタ機器を用いた電子軌道の歪み補正、ビーム電流の増大等の制御ハード/ソフトウェア整備等である。その結果、電子加速器システムは、ほぼ一人で運転ができるシステムとなり、LCS 光子のエネルギーと強度はオンラインで計測できるようになった。

その結果、画質が向上して、最終的には 1 mm 以下の

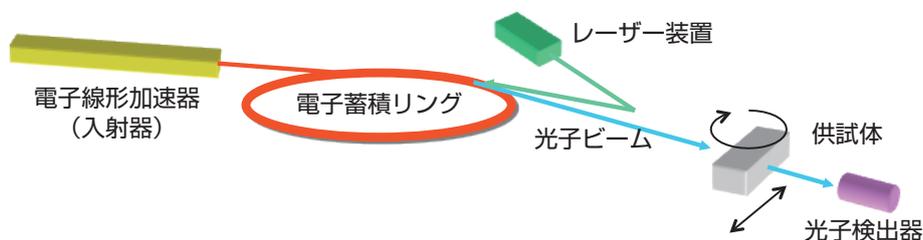


図4 電子加速器を用いたLCS光子CTシステム。

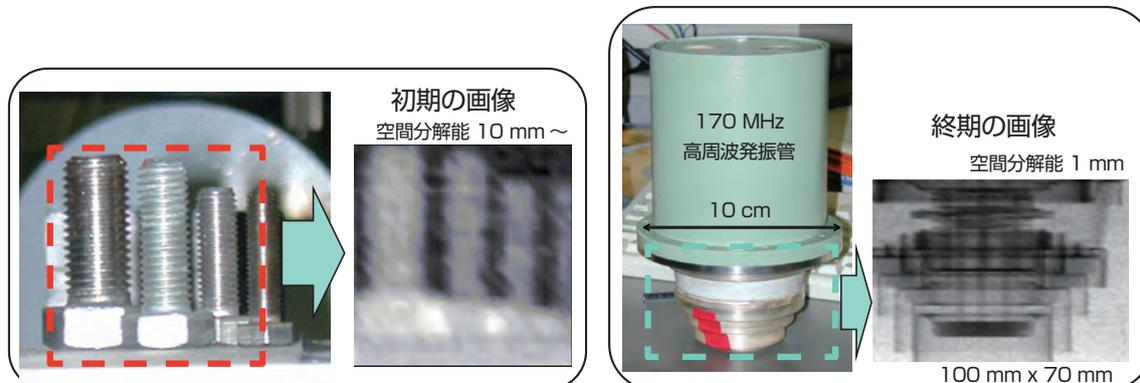


図5 LCS光子を用いた透過型ラジオグラフィ

左：ステンレスボルトを10 MeVのLCS光子で撮影（白黒を反転している）、右：高周波発振管の電極部を10 MeVのLCS光子で撮影（空間分解能1 mm。図の一部は参考文献[8]より引用）

空間分解能を達成し、高い解像度の画像を測定することができた<sup>[8]</sup>。また、高精細な CT 画像を得ることができた (図 6)<sup>[9]</sup>。その他、さまざまな物質に対して CT 値を正確に測定し、線減弱係数と線形であることを確認し、1 % 以下の密度分解能を達成することに成功した (図 7)<sup>[10]</sup>。さらに、本 CT システムを用いて、コンクリート中の 0.2 mm 幅のき裂や、厚さ 50 cm の鉄筋コンクリート断面の CT 等、インフラ診断のための計測技術としての有用性を検証することもできた<sup>[11]</sup>。

以上に述べた要素技術の改良やユーティリティの向上のための研究開発が、どのようにラジオグラフィの性能向上へ結びついたのかについて、図 8 にチャートによって整理した。

### (3) 研究成果の検証

装置の自動化が進むことで、ユーザーが自分で加速器の調整運転を行って LCS 光子ビームを発生することが可能となった。それに伴い、CT 研究にも成果が開始された。自動車産業や原子力産業関連の企業との共同研究を行い、持ち込まれた供試体を CT で計測し、その結果を評価し、さらに装置の改良を数年間重ねた。その過程で空間分解能や密度分解能の評価や向上を行い、当初目的とした性能を達成することができた。

本 CT システムを用いた数年間の実証実験を経て、これまで見えなかった製品の細部が見えるようになり、画像測定の定量性にも信頼性が増してきた。その後、次第にユー

ザーからは、自社の工場に導入できるような小型装置を開発して欲しいという声が聞かれるようになってきた。これを行うには加速器の小型化と低コスト化が必須である。

この論文でこれまでに述べてきた方法では、電子のエネルギーは数 100 MeV というかなり高い値が必要である。装置の小型化は加速器システムの小型化とはほぼ等価である。しかし加速エネルギーは装置規模に比例するため、単に装置寸法を小さくすることは困難である。小型加速器で高エネルギー加速を実現するには、いくつかの重要な技術開発が必要である。例えば、数 100 MV/m 以上の高電界に耐える材料の開発や表面処理技術、それらをサブマイクロメートル精度で機械加工する技術および超高真空下での使用、高精度な磁場分布を実現できる磁石の開発と磁極の機械加工技術、さらには電子ビームの空間電荷効果を抑えるビーム収束技術の大幅な高度化等が必要である。これらの全てにおいて部品単位での小型軽量化が必要である。真空部品のフランジ等の規格も改善する必要がある。大型加速器の全ての性能を、小型装置で実現することは非常に難しい。小型化するためには、ある特定の機能に絞った装置開発が必要である。

この研究によって、産業用高エネルギー光子 CT 技術の有用性や問題点が明らかになってきた。医療用 X 線 CT とは異なり、産業用ラジオグラフィではさまざまな材料を測定対象としており、焼結材や鋳物等の密度分布や異種材料の境界面を正確に測定する必要がある等、医療分野よりも

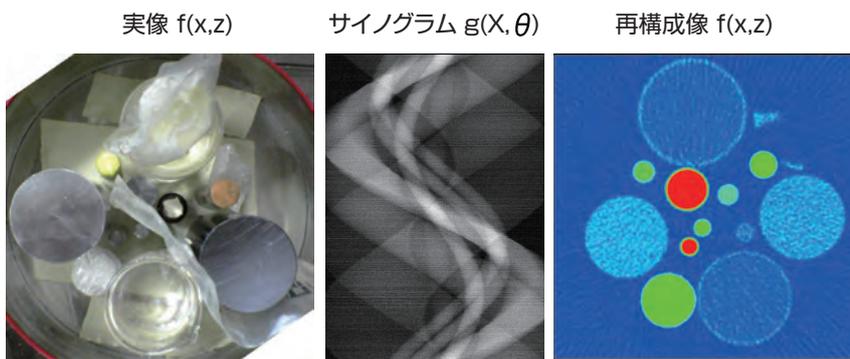


図 6 (左) サンプル写真、(中央) Sinogram、(右) CT 像<sup>[9]</sup>  
サンプルはビーカーに入れた水やシリコン、アルミニウム、タンゲステン等の各種金属ロッド。青色～緑色が低密度の領域を、黄色～赤色は高密度の領域を示している。

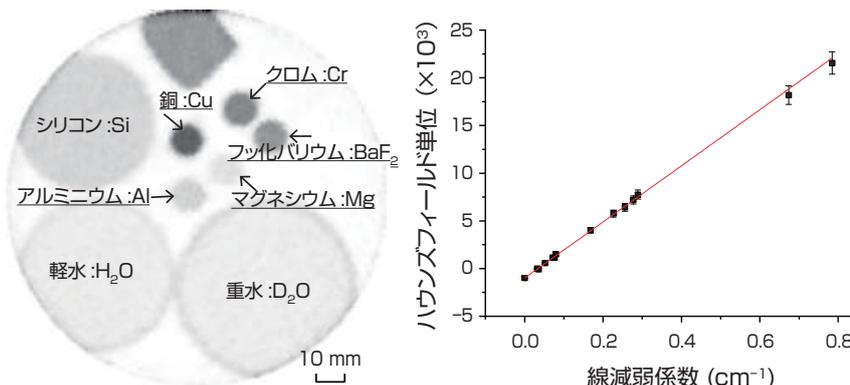


図 7 (左) さまざまな素材の線減弱係数と、HU で表した CT 値をプロットした<sup>[10]</sup>。図中の記号は物質を表す；例 D<sub>2</sub>O = 重水など。

広範で定量性のある計測結果が求められる。現在、高エネルギー X 線 CT を用いた産業用非破壊検査における、製品形状計測手法の標準化、標準となるサンプル材料の検討が進められている<sup>[12]</sup>。

#### 4 今後の展開

現在、この研究は加速器の小型・軽量化を検証するフェーズに入っており、テーブルトップサイズの電子加速器の開発と X 線非破壊検査への応用について研究を進めている。具体的には、MeV 領域の電子加速を数 cm の領域で行うことが可能な、高周波電子銃の開発を行い、コンクリート構造物内部の非破壊検査を行うことを目指している。高周波電子銃は加速器として最もシンプルである。この研究では、電子が放出されるカソード面にカーボンナノ構造体（Coniferous Carbon Nano Structure; CCNS）<sup>[13]</sup>を用いることで、カソードを加熱するヒーター機構を不要とし、さらにシンプルな構造のシステムを目指している。

加速器の軽量化には、さまざまな機構をシンプルにしていくことが非常に重要であり、技術開発全体を方向付けることになる。一つの要素技術に集中しすぎると全体を俯瞰することが難しくなるので、コアとなる技術を中心に据え、それを高度化することに研究資源を集中する。それによって、研究資源の費用対効果が向上できる。

現在、同装置を機械式アームやリニアステージ等へ搭載し、後方散乱 X 線等を用いて内部を透視するシステムを構築し、これをインフラ構造物の非破壊検査装置へ適用するためのプロジェクトを立ち上げたところである<sup>[14]</sup>。最大電子エネルギーおよび X 線エネルギーは、0.9 MeV を目指している。本システムでは、レーザーコンプトン散乱 (LCS) 光

子を用いるには電子エネルギーが低すぎるため制動放射線を用いる。そのため X 線エネルギーは連続分布をする白色となることから、高い密度分解能は達成できない。また、電子エネルギーが低いことから、発生する X 線のビーム指向性が低く、第 1 世代 CT のように細いビームを用いるためには強度が大幅に下がってしまう。そこで、ビームを細く絞らずに、良い画像を測定することが必要であることから、この研究では、新たに X 線カメラの開発も行う。現在、大学や企業等と一緒に、後方散乱 X 線イメージングシステムの開発を進めている。

冒頭部の再掲となるが、以上に述べたことを一般化すると以下のシナリオとなる。

- ①要素技術の開発と高度化
- ②ユーザー利用研究の推進
- ③研究成果の検証
- ④研究方向性の決定

概ね上記のような流れで研究を進めることで、効率よく橋渡し研究を実施できると思われる。特に②のユーザー対応は集中力と体力を要する仕事もあり、ここにあまり長く留まったり、研究資源を集中すると、装置の安定供給が主目的になってしまい、③への移行の時期を逸してしまうことがある。このフェーズはあくまでも③に至るための通過ポイントである。時には経営判断で強制的に③へ移行させることも必要である。橋渡し研究は社会の要請を研究現場が直に聴くことになるので、研究者に強い問題意識と動機付けが生じる。橋渡し研究をボトムアップで進めると、組織の研究資源が細分化され、ガバナンスが低下する危険がある。推進には組織力を強化する改革と一体で進めていく必要がある。

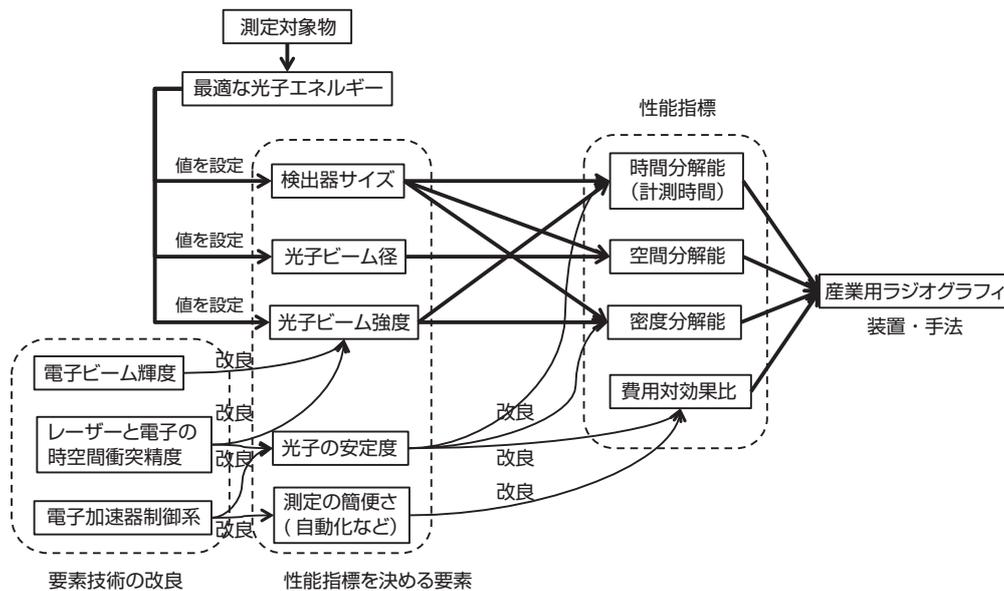


図8 要素技術の改良、性能指標を決める要素、および装置・手法の高度化との関係。

## 参考文献

- [1] 藤井正司: マイクロCT, 非破壊検査, 54 (5), 228-232 (2005).
- [2] M. Uesaka, T. Natsui, K. Lee, K. Dobashi, T. Yamamoto, T. Fujiwara, H. Zhu, K. Demachi, E. Tanabe, M. Yamamoto, N. Nakamura, J. Kusano, T. Higo, S. Fukuda, M. Yoshida and S. Matsumoto: 950 keV, 3.95 MeV and 6 MeV X-band linacs for nondestructive evaluation and medicine, *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A*, 657 (1), 82-87 (2011).
- [3] R. H. Milburn: Electron scattering by an intense polarized photon field, *Phys. Rev. Lett.*, 10 (3), 75-77 (1963).
- [4] T. Yamazaki, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Mikado, M. Chiwaki and T. Tomimasu: Generation of quasi-monochromatic photon beams from Compton backscattered laser light at ETL electron storage ring, *IEEE Trans. Nucl. Sci. NS*, 32 (5II), 3406-3408 (1985).
- [5] T. Tomimasu, T. Noguchi, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado and M. Chiwaki: A 600-MeV ETL electron storage ring, *IEEE Trans. Nucl. Sci. NS*, 30 (4II), 3133-3135 (1983).
- [6] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest\* (<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>), Accessed 2015-01-18.
- [7] H. Toyokawa, S. Goko, S. Hohara, T. Kaihori, F. Kaneko, R. Kuroda, N. Oshima, M. Tanaka, M. Koike, A. Kinomura, H. Ogawa, N. Sei, R. Suzuki, T. Ohdaira, K. Yamada and H. Ohgaki: Recent progress in generation and application of AIST laser-Compton gamma-ray beam, *Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A*, 608 (1 Supp.), S41-43 (2009).
- [8] H. Toyokawa, H. Ohgaki, T. Mikado and K. Yamada: High-energy photon radiography system using laser-Compton scattering for inspection of bulk materials, *Rev. Sci. Instrum.*, 73 (9), 3358-3362 (2002).
- [9] 豊川弘之: レーザーコンプトン光子ビームを用いた $\gamma$ 線CT, *応用物理*, 78 (4), 351-354 (2009).
- [10] H. Toyokawa: Industrial imaging method using high-energy photon beam CT, *Proc. 3rd International Workshop on Process Tomography (IWPT-3)*, 95(1)-95(8) (2009).
- [11] H. Toyokawa, H. Kanada, T. Kaihori, M. Koike and K. Yamada: Application of high-energy photon CT system with laser-Compton scattering to non-destructive test, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 55 (6), 3571-3578 (2008).
- [12] 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会: 「次世代3次元内外計測の評価基盤技術開発」事前評価報告書, (2012).
- [13] 鈴木良一: 乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発。- X線非破壊検査におけるイノベーションを目指して -, *Synthesiology*, 2 (3), 237-243 (2009).
- [14] JST (平成26年10月28日): SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)課題「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」において新たに4名の研究責任者を公表, プレスリリース(科学技術振興機構報第1064号), <http://www.jst.go.jp/pr/info/info1064/index.html>, 閲覧日2015-01-18.

## 執筆者略歴

豊川 弘之 (とよかわ ひろゆき)

1997年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門、2004年から計測フロンティア研究部門。2010年から同研究部門光・量子イメージング技術研究グループ長。2013年から同研究部門小型量子ビーム源グループ長。



## 査読者との議論

## 議論1 全体

コメント(小林 直人: 早稲田大学研究戦略センター)

この論文はレーザーコンプトン散乱のラジオグラフィへの応用技術について述べたものです。著者の長年の豊富な研究成果を整理する形で、目標に向かって技術を選択・統合した過程を述べ、極めてしっかりした内容になっておりシンセシオロジーにふさわしい論文になったと言えます。

ただし初稿前半のレーザーコンプトン散乱応用の部分は、すでに他論文に掲載されたものをレビューした形になっており、必ずしもシンセシオロジーに特有の構成学的研究を十分記しているとは言えませんでした。構成学の論文としては、具体的な目標(レーザーコンプトン散乱のラジオグラフィへの応用)を実現するためにどのような研究開発シナリオを作り、どのように要素技術を選択し、さらに統合してシナリオの実現に至ったかを順序良く述べるとよいと考えられます。また論旨を明確にするためにも、それらを図示することも必要だと思われました。

## 議論2 論文の主眼について

コメント(一村 信吾: 名古屋大学イノベーション戦略室)

考察で記述されていたように、「基礎研究成果を、企業活動へ太く強く結びつけることが要求される場合がある。いわゆる橋渡し研究の重視である。橋渡し研究とは、自分の拘りや考え方を整理して社会に受け入れられる姿に徐々に近づけていく作業である。」という点、を論文の主眼としてはいかがでしょうか。すなわち、「橋渡し研究の方法論」を論文の主眼としてはどうかと思います。

またその方法論を「高エネルギー光子ビームの発生技術と非破壊検査への応用」を事例として扱うことにして、その際、論文にも記述がある

A) 成果を急ぐあまり安易に妥協して周囲に迎合すると研究レベルが下がってしまう、

B) 自分のやり方に拘り過ぎると社会から離れてしまう

C) 繊細で忍耐強い擦り合わせ作業が必要である。

D) さらに、タイムリミットもある。

という項目に関して、具体的にどのように折り合いをつけていったのかを、現在の論文の前半に記述された内容をもとに整理してみたいかがでしょうか

コメント(小林 直人)

アブストラクトに「技術が一つの形を持つに至る過程について考察した」とあり、その形とは「社会への貢献」であると考え、それはシンセシオロジーの論文として価値があることなので、その「過程」とその「考察」に力点を置いて論文を再構成されるのが望ましいと思われる。その意味では、「橋渡し研究」を一つの目標としたときに、それに向けてのシナリオとして、第6、7章で記された内容を提示し、それを構成する要素技術としてのLCSの個々の技術の選択と統合の「過程」を述べ、最後に考察を記すという構成をすることを勧めたいと思います。

回答(豊川 弘之)

頂いたご意見を参考にして、論文構成を大きく変えました。技術のレビューは最低限述べるとどめ、全体を4章から構成することとしました。

1章は研究の背景やこの論文で取り上げる研究の領域について、2章では学術的背景と研究の過程について技術レビューを交え解説しました。3章では技術の選択と統合の過程について具体例を示しました。また全体の目標やそれに向けた技術の構成を示す図8「要素技術の改良、性能指標を決める要素、および装置・手法の高度化との関係」を入れました。4章では前章に示した事実に対して補足説明を行いつつ、成果の意義や位置付けについて述べました。これによって、この論文を橋渡し研究の方法論に拡張することを目指しました。

ただし、橋渡し研究の方法論というレベルまで持ち上げることは、なかなか難しい作業です。方法論として普遍化しようとする、一般的な言葉に集約されがちなこと、具体例から一般論へ展開する際にさまざまな情報の粒度が係わってくるのが問題の本質で、この論文の難しさはそこにあると思いました。

### 議論3 論文の再整理について

コメント（一村 信吾）

改訂論文は3章と4章において、下記の①～⑥の番号に応じた内容を展開しています。

- ①要素技術開発を行う（本例では5年間。基礎研究が実施可能な外部資金を活用）。
- ②原理実証の後に利用研究を開始。同時に装置のユーティリティを高度化する。
- ③ユーザー利用研究を円滑に進める。
- ④今後の装置・技術開発のポイントを整理。
- ⑤研究を進めるかどうか、費用対効果比や所属組織の事情等を加味して判断する。
- ⑥判断結果が出たら速やかに技術開発を開始する。

また改訂論文は、概ね①～②までが3章、③～⑥までが4章になっています。しかし内容的には①～④までが開発の1段階で、⑤、⑥は、それを踏まえたさらなる展開段階とも考えられるのではないでしょ

うか。この考え方が妥当であれば、3章と4章を再整理して、①～④までに相当する章（タイトルは現在の3章のものでよい）と、⑤、⑥に相当する章に分け直したほうがよいと思います。また①～⑥の番号に応じたサブタイトルをつけて分けると分かりやすいです。併せて、下記に関する記述を若干詳しくしていただくと読者が理解しやすいでしょう。

- A) 「要素技術の開発」として第1世代のCTと呼ばれる方法を選択したとしても、著者の独自性の高い開発項目があったはず。それに関する具体的な記述があるとわかりやすい。簡単な表で示すのもよい。
- B) 「ユーティリティの高度化」に相当する箇所では、どのような検査対象で何が不足と考えられ、その解決に向けて高度化したのか、もう少し詳しい記述があったほうがよい。
- C) ⑤に相当する記述のエッセンス部分では、どんな要請（考慮）条件のもとで、どのような判断を下し、記述された結論に至ったかに関してもう少し記述を加えていただくと、橋渡し研究を方法論的に理解する上で役立つ。

回答（豊川 弘之）

頂いたコメントを参考にして、全体の構成を調整しました。併せて、説明を適宜加筆修正、削除、移動等を行いました。それぞれについては3章(1)、(2)、(3)において少し詳しく記述しました。