

# 世界初非破壊検査装置開発へのチャレンジ

## — レーザー超音波と冷陰極X線源による検査装置の開発 —

王 波、高坪 純治、齊藤 典生\*、劉 小軍、鈴木 修一

日本は先のオリンピックに代表される50年以上前の高度経済成長期に建設された社会インフラ、産業インフラが老朽化の一途を辿り、さらに2020年の東京オリンピックを成功させるためにも、その経年変化に対する健全性検査が急務の課題となっている。そこで、我々は産業技術総合研究所発の技術移転ベンチャーとして、産業技術総合研究所で研究開発された非破壊検査技術の中でレーザー超音波による世界初の可視化技術とカーボンナノ構造体冷陰極X線による小型X線技術をもとにして、新しい日本産の非破壊検査装置を研究、開発し、実用に供してきた。ここでは、その開発における各種のチャレンジについて述べる。

**キーワード:** 非破壊検査、レーザー超音波、X線検査、可視化、小型化、画像処理、経年変化

## Challenges to the development of the world's first nondestructive inspection system

—Development of an inspection system with laser ultrasound and a cold cathode X-ray source—

Bo WANG, Junji TAKATSUBO, Norio SAITO\*, Xiaojun LIU and Shuichi SUZUKI

The social and industrial infrastructure built for the 1964 Tokyo Olympics, during a period of high economic growth, has become old. This infrastructure urgently needs inspection for the success of the 2020 Tokyo Olympics. As an AIST Start-up, we are conducting research and development of a new nondestructive inspection system based on the world's first visualization technology using laser ultrasound and compact X-ray technology with carbon nanostructure cold cathode X-rays. Here we describe various challenges for its development.

**Keywords:** Nondestructive inspection, laser ultrasound, X-ray inspection, visualization, miniaturization, image processing, secular change

### 1 はじめに

現在日本は高度成長期に建設された社会インフラ、産業インフラの老朽化問題に直面している。その保全検査には各種検査装置が導入されているが、ほとんどが海外からの輸入品を使用している現状がある。

我々は産業技術総合研究所発の技術移転ベンチャーとして、社会インフラ、産業インフラ検査用の新しい非破壊検査装置を研究開発、製品化し、安全安心に貢献すべく努力している。

その一つがレーザー超音波可視化検査装置である。これは検査体表面をレーザー走査して熱歪み超音波を発生させ、その超音波の伝搬の挙動を可視化する世界初の装置である。この装置は、(1) 複雑形状の物体を非破壊で検査できる、(2) 遠隔から高速で対象物の検査ができる、という特長がある。

もう一つが小型・省電力の冷陰極X線管を搭載した乾

電池でも駆動できる手のひらサイズの小型X線検査装置である。この装置は、小型軽量で、予熱不要で即座にX線を発生でき、単3乾電池でも駆動できるほど省電力で、長寿命という特長を有している。

ここでは、レーザー超音波可視化検査装置および乾電池駆動小型X線検査装置の開発と各種検査への応用について述べる。

### 2 レーザー超音波可視化検査装置とその非破壊検査への応用

レーザー超音波とは、レーザー光を用いて対象物での超音波発生や検出を非接触で行う技術である。離れた場所から非破壊で超音波の送受信ができ、複雑形状や大面積、さらに高温や高所の物体等、従来装置では検査が困難であった対象物の検査が可能になるため、航空機、自動車、工業プラント、火力・原子力発電所、電子部品また、

つくばテクノロジー株式会社 〒305-0047 つくば市千現 1-14-11  
Tsukuba Technology Co., Ltd. 1-14-11 Sengen, Tsukuba 305-0047, Japan \* E-mail: saito@tsukubatech.co.jp

Original manuscript received March 3, 2017, Revisions received May 10, 2017, Accepted May 15, 2017

鋼橋等社会インフラへの新しい検査装置として期待を集めている。

図1の弊社で開発したレーザー超音波可視化検査装置は、検査体表面をレーザー走査することにより超音波の伝搬を動画映像として可視化する装置である。物体に欠陥があると、あたかも水面から泉が湧き上がるような波紋が観察されるので、検査を専門としない人にも分かり易いという今までにない装置<sup>1)</sup>である。

### 3 可視化原理

この可視化法の特徴は、超音波の受信側ではなく、発振側を走査して超音波伝搬映像を計測する点にある。これは超音波伝搬の相反性(送受信の方向を逆にしても受信波形が変化しないこと)が成立することを前提としている。例えば、図2上図に示すように、欠陥(曲率半径20 mm、深さ4 mmの球面溝)を挟んで斜角探触子Aと垂直探触子Bを配置して超音波の送受信を行ったとき、個々の探触子の発振特性と受信特性が同じであれば、超音波パルサーからAに信号を送ってBで受信した波形と、逆にBに信号を送ってAで受信した波形は図2下図に示すようにほぼ一致する。したがって、図3の上図に示すように、PZT探触子の場合には、超音波の入射方向や欠陥の有無に拘わらず、送受信の方向を入れ換えてもその計測系は等価だと見なすことができる。これをレーザーとPZTの計測系に当てはめて考えてみると、図3下図に示すように、レーザーで熱励起超音波を発生させてPZT探触子で受信した計測系と、逆に、PZT探触子で超音波を発生させ、レーザー発振と同じ特性を有するレーザープローブで受信した計測系は等価だと考えることができる。したがって、レーザーで超音波発振点を走査させ、固定点に取り付けたPZT探触子で受信する計測系は、固定点のPZT探触子で発振した超音波を、レーザープローブを走査しながら受信する計測系と等価だと考えることができるので、各レーザー走査点での受信振幅を輝度(色)変調しながら時系

列的に画像表示すれば固定点のPZT探触子から発振した超音波の動画映像を取得することができる。受信側のレーザープローブを走査する従来計測法では焦点距離を一定に保った上でレーザー光を検査体に垂直に入射しなければならないという制約があったが、発振側のレーザー走査では焦点距離や入射角にほとんど制限がないので高速で自由にレーザービームを振ることができ、三次元形状物体を伝える超音波の可視化が可能になった。

### 4 レーザー超音波可視化検査装置(LUVI)

レーザー超音波可視化検査装置(LUVI: Laser Ultrasonic Visualizing Inspector)の構成図を図4に示す。その仕組みはパソコンでレーザーとガルバノミラーおよび高速A/D変換器を同期制御し、パルスレーザーを検査

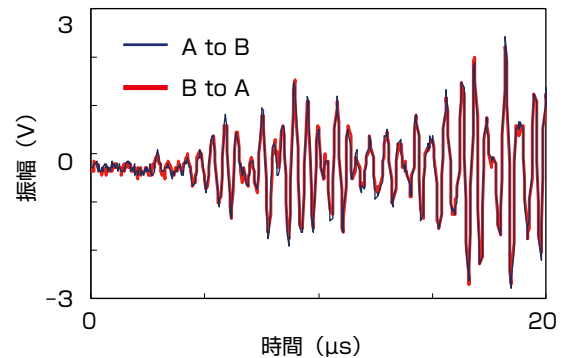
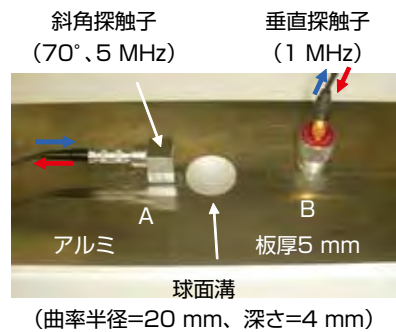


図2 超音波伝搬の相反性



図1 レーザー超音波可視化検査装置と可視化画像例(厚さ6 mmのステンレス製エルボーの表面に二つの矢印部に模擬欠陥あり)

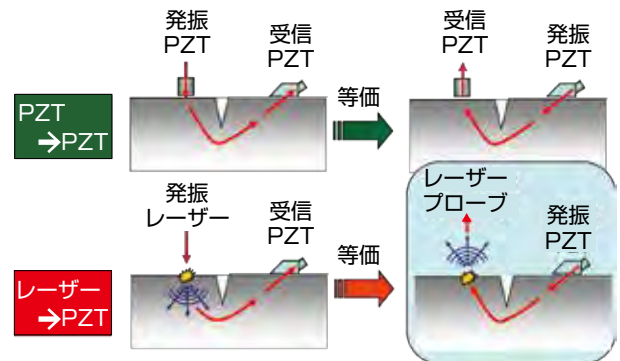


図3 PZT-PZT送受信系とレーザー-PZT送受信系の相反性の比較

対象物表面に格子状に高速走査させる。すると、熱歪みによる微弱な超音波が励起される。その超音波伝搬信号を「接触式計測」では、対象物に取り付けた圧電受信センサ（最大 8 個）で、あるいは「非接触計測」では非接触で受信可能なレーザードップラー振動計を用いて検出し、超低雑音増幅器を通して信号を増幅し、高速 A/D 変換器により、パソコンのハードディスクに記録する。このレーザー走査点から受信センサに向かう複数の超音波伝搬信号を超音波伝搬の相反定理より再構成することで、受信センサ部から発振される超音波の動画映像として可視化できる。

## 5 レーザー超音波可視化検査装置の種類

レーザー超音波可視化検査装置 (LUVI) には、図 5 のように受信センサを接触させる「接触式計測」と、レーザー

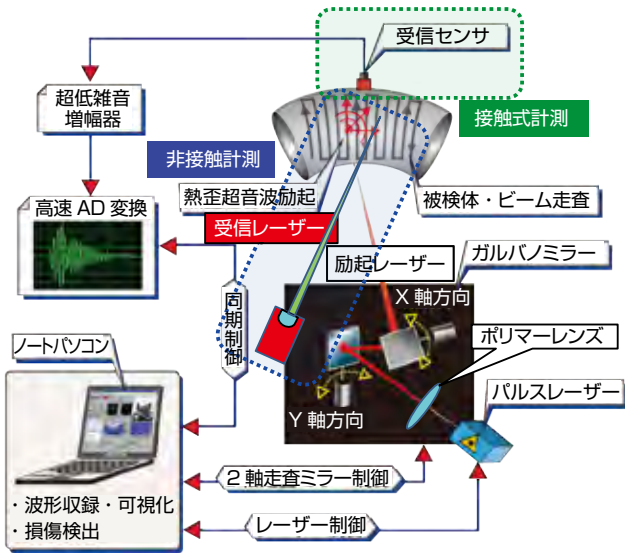


図4 レーザー超音波可視化検査装置 (LUVI) 構成図

### 【接触式計測】



### 【非接触式計測】



図5 接触式計測と非接触式計測レーザー超音波可視化検査装置

プローブを用いる「非接触式計測」とがある。

ここで、以下に LUVI の特長を示す。

1. 動画映像なので専門家でも分かり易い。
2. 非接触走査なので複雑形状物体 (曲面、凹凸) でも検査が容易。
3. ミラーによる高速走査なので広い範囲を迅速に検査可能。
4. 非接触検査なので、危険箇所 (放射能、高温、高所) の検査に有効。
5. ウェブカメラ画像を動画映像にスーパーインポーズして表示可能。
6. 計測画像に表示された異常箇所はその表面にガイド光で指示し、リアルタイムに欠陥位置を確認可能。

## 6 非破壊検査への適用例

### 6.1 溶接部の検査 (T字溶接継手)

次にレーザー超音波可視化検査装置の溶接部への適用事例として、レーザー走査速度 5,000 点 / 秒の高速映像化の例を紹介する<sup>[2]</sup>。

図 6 の幅 100 mm の T 字溶接継手 (SS400 材) の溶接部を

- ① 走査速度：1,000 Hz、走査ピッチ 0.8 mm
- ② 走査速度：5,000 Hz、走査ピッチ 0.8 mm
- ③ 走査速度：5,000 Hz、走査ピッチ 1.5 mm

の各計測条件でレーザー超音波可視化検査装置を使って計測した画像を示す。実際には、この対象物の模擬き裂のある T 字溶接部に波長 1064 nm のパルスレーザーを走査し、その信号を検出し、計測映像を画像解析してその場で内部傷エコーを可視化した結果が図 7 となる。

溶接部はそれ自体が大きな欠陥であり、多くの擬似エコーが発生するので、欠陥エコーの識別が難しいが、超音波の伝搬を可視化すれば識別し易くなる。



図6 T字溶接継手 (溶接コーナー部に欠陥)

これらの図より、

- ①走査速度：1,000 Hz、走査ピッチ0.8 mmの時、走査時間は40秒、
- ②走査速度：5,000 Hz、走査ピッチ0.8 mmの時、走査時間は8秒、
- ③走査速度：5,000 Hz、走査ピッチ1.5 mmの時、走査時間は2秒

であった。

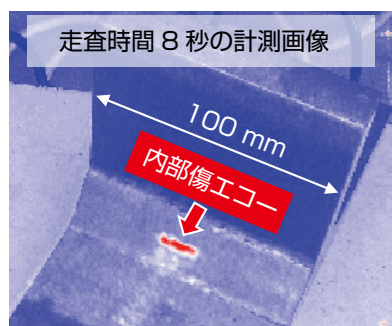
この結果より、

- ①走査速度：1,000 Hz、走査ピッチ0.8 mmの時、走査時間が40秒であったものが、
- ③走査速度：5,000 Hz、走査ピッチ1.5 mmの時、走査時間は2秒となり、

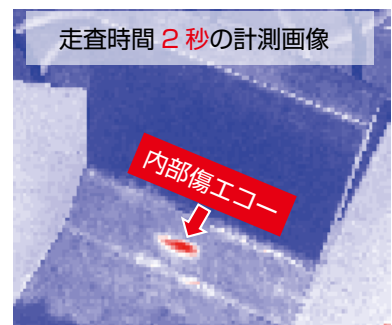
図7を見ると③の走査時間2秒の場合でも、内部傷エコーが



①走査速度：1,000 Hz、走査ピッチ 0.8 mm



②走査速度：5,000 Hz、走査ピッチ 0.8 mm



③走査速度：5,000 Hz、走査ピッチ 1.5 mm

図7 超音波伝搬の高速映像化

明確に検出できている。したがってレーザー走査速度5,000点/秒で、識別の難しい溶接部でさえ、2秒という短い時間で迅速な検査が実現できた<sup>[3]</sup>。

## 6.2 CFRPの検査 (航空機ファンブレード)

図9は図8のCFRP (炭素繊維強化複合材料) 製の航空機ファンブレード (長さ約1.5 m) の超音波伝搬画像である。超音波センサをファンブレードの裏側に取り付け、ピッチ3 mmで1.5 m離れた所からパルスレーザーをブレード表面にレーザー走査した。この時の計測時間は50秒 (走査速度2,000 Hz) であった。CFRPは超音波の減衰が大きいことから、超音波センサとしては低周波 (100 kHz) の垂直センサを用いている。この検査体には特に欠陥はないが、1個の受信センサでファンブレード全面を伝わる超音波を計測できた。このようなCFRPの検査は航空機に限らず、自動車への応用が進められている分野である。

## 6.3 非接触式計測 (碍子)

以上は受信センサが接触式計測の結果であったが、以下にレーザープローブを用いた可視化例を紹介する。

高電圧の碍子では、感電の危険があるので、受信センサを碍子に直接取り付けることはできず、非接触式計測での検査が必要となる。そこで、図10右に示すようなスリット傷入りの碍子で、図10左のようにスリット傷の非接触式計測を試みた。

図11に計測したスリット傷エコーを示す。非接触式計



図8 CFRP航空機ファンブレード



図9 CFRP航空機ファンブレードの超音波伝搬画像

測では接触式計測より受信感度が低下するので、同一点を5回照射して平均化を行った。このようにレーザープローブ照射点から広がっていく超音波の進行波とスリット傷からのエコーが観察できている。

#### 6.4 社会インフラの検査 (鋼橋)

これまで産業インフラへの非破壊検査の応用を述べてきたが、現在国家をあげて喫緊の課題となっているのが、老朽化している社会インフラの検査である。我々は、特に鋼橋に発生するき裂欠陥を、レーザー超音波を利用して遠隔から効率的に検出できる非接触・非破壊の欠陥検査技術を開発し、点検精度の向上と点検作業の省力化・平易化を図ろうとしている。

実際の鋼橋検査の様子を図12に示す。図12右のように検査装置は点検作業車に積んで主桁上フランジの補強材

溶接部の近くからレーザーを走査し、接触式センサを取り付け超音波エコーにより疲労き裂の可視化計測を試みた。

図13左の枠部分を計測して観測されたき裂エコーを同図右に示す。ここで重要なのは鋼橋の検査面を塗膜上からレーザー走査しても超音波が伝わる様子を動画映像として計測できることである。このようにき裂があれば計測映像の中に波紋状のエコーが観察されるので、塗膜の上からき裂の有無と規模を判定できる。また、レーザーによる非接触走査なので、コーナー溶接部のような複雑形状部や広い検査面でも遠隔から迅速にエコーが観察できる。

#### 7 レーザー超音波技術の今後

レーザー超音波可視化検査装置は、工業プラント配管や航空機エンジンブレード、ロケット燃焼器のような曲面形

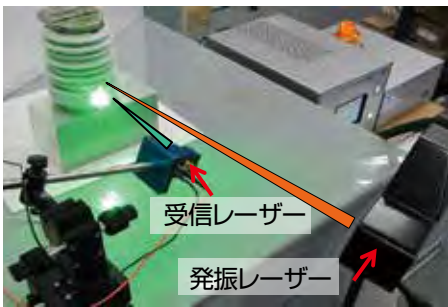


図10 き裂を有する碍子

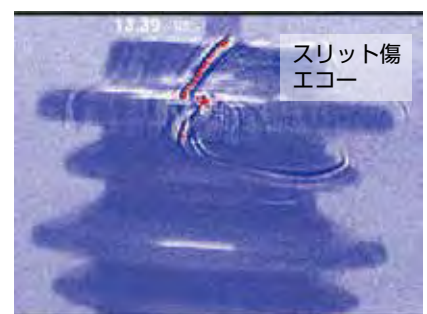


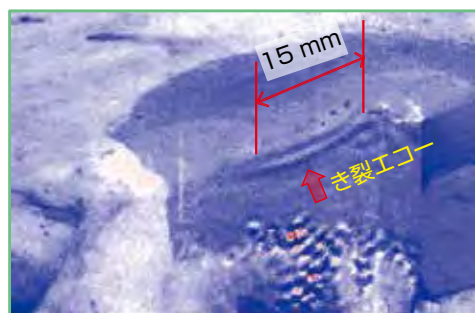
図11 き裂を有する碍子の非接触式計測画像



図12 鋼橋溶接部の疲労き裂検査の様子



図13 鋼橋溶接部の疲労き裂エコー



状物体の検査、自動車エンジンブロックやミッションケース等の狭あい部や凹凸部の検査、原子力発電所等放射線環境下での検査、溶接時等高温下での検査、トンネルや鋼橋のような高所の検査、航空機や自動車の CFRP 材料の検査等、これまで検査が難しいとされてきた検査を可能とする画期的な検査技術として注目され、導入が進んでいる。

### 8 乾電池駆動小型X線検査装置とその非破壊検査への応用

我々は産業技術総合研究所で研究されたカーボンナノ構造体冷陰極 X 線管<sup>[4]</sup>を用いて、60 kV、100 kV、120 kV、150 kV 出力の X 線検査装置を開発<sup>[5]</sup>、製品化<sup>[6][7]</sup>した。特に単 3 乾電池 1 本で実用レベルの検査ができる手のひらサイズの小型 X 線検査装置は今までにないものである。これにより、今まで X 線装置を持ち込めなかった場所に X 線装置を持ち運んでいつでも現場で検査することが可能となる。ここでは、これら X 線検査装置の各分野への具体的な応用について紹介する。

### 9 乾電池でも駆動可能な冷陰極 X 線管

我々の小型 X 線検査装置に採用されているカーボンナノ構造体とその冷陰極電子源の写真を図 14 に示す。

この写真のようにカーボンナノ構造体冷陰極電子源は、針葉樹のようになっていて、基板側が太く、電界の力に対する耐性が強くなっている。これは、基板側が太いと、木

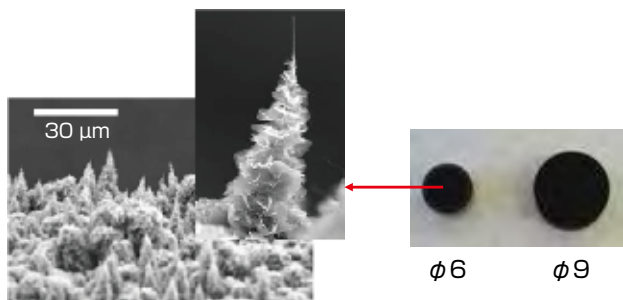


図14 カーボンナノ構造体 (左) と冷陰極電子源 (右)



図15 カーボンナノ構造体の冷陰極電子源を搭載した冷陰極 X 線管

表 1 熱陰極式 X 線管と冷陰極式 X 線管の比較

熱陰極式 X 線管	冷陰極式 X 線管
①フィラメントからの熱電子放出型 ②フィラメントの加熱と待機の電力が必要 ③フィラメントの温度が一定になるまで待つ必要あり ④予熱が必要でランニングコストも高い ⑤電源部を含めると大型で質量が重く取り扱いに不便 ⑥フィラメントが寿命の一因となる	①冷陰極カーボンナノ構造体の電界放出型 ②フィラメントの加熱と待機の電力が不要 ③パルス動作で X 線管の即時起動が可能 ④乾電池でも動作可能でランニングコストが安価 ⑤ X 線発生装置全体の小型軽量化が可能 ⑥カーボンナノ構造体により 1000 万ショットの長寿命

と同じで先端から少しずつ損耗しても基板側は太いので、電界を受けても、木の根元側のように、影響を受けにくく、耐性が強くなるためである。そのため、一般の X 線管で使用されている熱陰極電子源のヒーターやフィラメントより長寿命という特長がある。このカーボンナノ構造体冷陰極電子源を搭載した冷陰極 X 線管を図 15 に示す。

この図 15 の冷陰極 X 線管は単 3 乾電池 2～3 本分ぐらいの長さで、図 14 のカーボンナノ構造体冷陰極電子源の先端から、電界放出現象によって多数の電子が放出される。また、この X 線管にはヒーターやフィラメントがないため、予熱やエージングが不要で、すぐに X 線を照射できる。しかも、X 線の発生時にしか電力を消費しないので、単 3 乾電池 1 本でも駆動できるほど省電力である。

表 1 に熱陰極式 X 線管との比較、図 16 に熱陰極式 X 線管の内部構造、図 17 に冷陰極式 X 線管の内部構造を示す。

ここで、熱陰極電子源は、熱電子を放出させるために、予熱・待機電圧が必要でその分の回路も必要になるので、

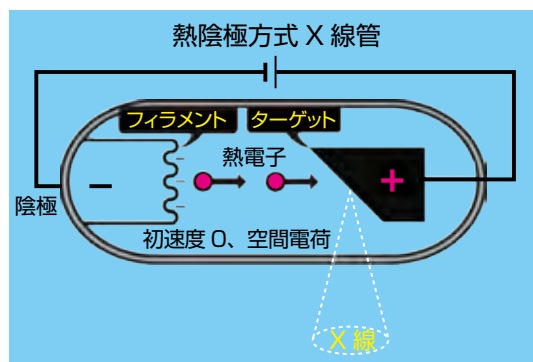


図16 熱陰極式 X 線管の内部構造

装置全体が大型で重くなる傾向がある。それに比べ冷陰極電子源は、電圧を加えるとすぐに電界電子が放出するので、即時照射で予熱・待機電圧が不要で、省電力かつ小型軽量になるという利点がある。

## 10 単3乾電池駆動小型X線検査装置

上記の冷陰極 X 線管を搭載し、実用化した手のひらサイズの乾電池駆動小型 X 線検査装置を図 18 に示す。この装置は独自の昇圧回路により単 3 乾電池 1 本の電圧 (1.5 V) を何段にも昇圧し、4 万倍の管電圧 60 kV まで昇圧している。これによって、厚さ 70 mm 以下、本体質量 1.8 kg、単 3 乾電池 1 本で、管電圧 60 kV の X 線を照射することができる。

この装置は、小型軽量ながら単 3 乾電池 1 本で 1 ショット 50 ms のパルス X 線を約 100 ショット照射することができる。また、実際に非破壊検査装置として使用する場合は、横 2 cm × 縦 3 cm × 厚さ 1 cm 程度の小型リチウムイオンバッテリー 7.2 V を 2 個搭載し、昇圧倍数を最適化し、照射可能パルス数を 5000 ショット程度としている。

X 線の実効焦点サイズは 1 mm となっており、一般的な熱フィラメントの X 線管を搭載した X 線検査装置の実効焦

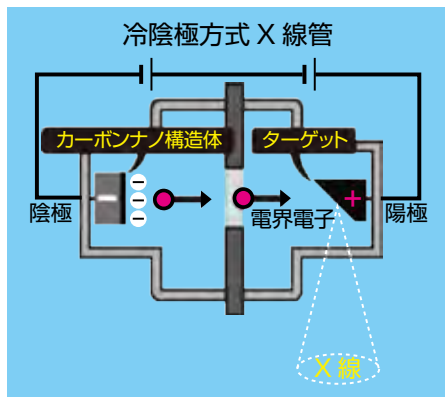


図17 冷陰極式X線管の内部構造



図18 手のひらサイズの乾電池駆動小型X線検査装置

点サイズ 3 mm 程度に比べて小さく、対象物との距離を短くして撮像しても高精細な画像が得られる。

## 11 配管用小型X線検査装置

### 11.1 小型X線源

工業プラントの現場配管は配管と配管の間隔が 10 cm 程度になっている。そのため、従来の X 線源ではこの隙間に入れて検査することは難しかった。我々は X 線源の厚さを 7 cm に設定し、配管と配管の間隔に入れて X 線照射できる装置<sup>[8]</sup>とした。

図 19 に厚さ 7 cm で開発した小型 X 線源を示す。この X 線源は、X 線管に先述の冷陰極 X 線管を使用し、厚さ 7 cm、重さ 6 kg と小型軽量ながら、管電圧 150 kV、管電流最大 2 mA という性能を持っている。また、工業プラントで高所や狭所にある配管を離れた所から X 線検査できるように、コントローラーを用い 20 m 離れた所から X 線を照射し、検出器の画像を取得できる。これにより、作業者に安全で効率的な検査が可能である。またバッテリー駆動により、100 V 電源が必要なく、現場での使用に相応しい装置である。

### 11.2 開発した装置

我々の開発した配管用小型 X 線検査装置を図 20 に示す。この装置は 20 m 離れて X 線を照射できるコントロー



図19 小型X線源



図20 配管用小型X線検査装置

ラー付きで、厚さ7 cmの小型X線源と幅5 cmの薄型検出器と、制御&表示パソコンとから構成されている。これらにより、小型軽量、可搬型で、機動性に優れ、保温材付き配管の隙間に入れて検査ができる。

我々は、この装置で配管を検査するため、冷陰極X線管および昇圧回路を新たに開発し、150 kVの出力を達成した。ここで、管電圧が150 kVになったため、絶縁モールドも独自の固体モールドとし、可搬性に優れたものとした。さらに、X線源本体の厚さを7 cmにするため、高電圧回路を小型化、高集積化して筐体に収納した。コントローラーを使えば、配管の口径と肉厚により、管電圧、管電流、パルス幅、パルス数等の撮影条件を変えて、X線源と20 m離れた所からX線を照射できる。制御&表示パソコンは、画面上でX線照射のボタンを押すとX線が照射され、検出器のデータが取り込まれ、画像処理して、撮影画像をリアルタイムに表示できる。表示された画像は明るさ・コントラストの調整やズーム表示、寸法表示もできる。

### 11.3 配管の減肉検査

X線源は厚さ7 cm、重さ6 kgで、配管と配管の隙間に入れて、バッテリー駆動で、横方向にX線照射し、20 m離れた所からコントローラーを使って、管電圧100～150 kV、パルス幅30～200 msのパルスX線を照射できる。

また、実効焦点サイズが1 mmで、保温材を付けたまま配管のすぐ近くでX線を照射しても高精細の画像が得られる。この装置を使って減肉した配管を模した対象物を寸法表示した例を図21に示す。この画像は端部の突起を削った模擬減肉配管を撮影した画像である。この配管の外径は34 mm、肉厚6.8 mm、突起部の減肉深さ1.8 mmであった。撮影時の条件は管電圧140 kV、管電流1 mA、パルス幅100 ms、1パルスとした。

その結果、突起部の減肉深さを表示して、実物の値と比較すると、

実物の値：

突起部長さ：21.0 mm、突起部深さ：1.8 mm

寸法表示の値：

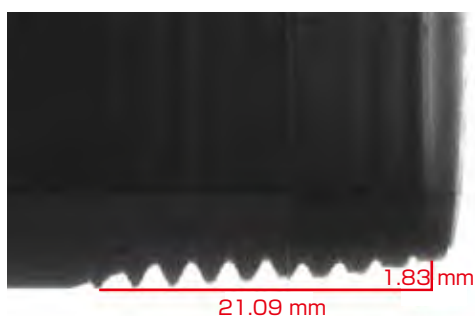


図21 配管の寸法表示例

突起部長さ：21.09 mm、突起部深さ：1.83 mm

となった。これらの値より、実物の値と寸法表示の値の差は、突起部長さで0.09 mm、突起部深さで0.03 mmと、配管検査時の減肉測定の可能性が確認できた。

## 12 電線用小型X線検査装置

### 12.1 電線検査の現状と課題

2020年東京オリンピックが決まり、国家をあげて社会インフラ、産業インフラの保全が急務の課題となっているが、そうしたインフラ設備の中で、電力を供給する電線設備およびその検査は重要な検査と言える。

しかし、これまで送電線の有効な検査手段はなく、高圧送電線の検査方法としては、検査員が電線に登り、電線を目視で検査する方法が行われている。この方法は高所作業で危険が伴い、かつ停電させなければならず、安全で効率的に検査するのは難しいという課題がある。

そこで、我々はこの課題を解決するため、先述した冷陰極X線管を搭載した乾電池駆動小型X線源とFPD (Flat Panel Detector) <sup>用語</sup>を組み合わせた電線用小型X線検査装置を開発し、実用化を進めている。

### 12.2 電線用小型X線検査装置

冷陰極X線管を搭載した電線用小型X線検査装置を図22に示す。

この装置は、先に紹介した60 kVの小型X線検査装置の管電圧を上げて電線検査に必要な70～120 kVを得られるようにX線管および昇圧回路を新規開発した。

この装置は、X線検査装置部と操作&画像表示パソコンからなり、前者は小型X線源とFPDから構成されている。実際の検査の際は、X線検査装置部の小型X線源とFPDとの間に対象物である電線を置いて蓋を閉め、電線を挟んだ状態で固定してX線を照射して検査する。

この装置は制御パネルにより、X線検査装置部単体で管電圧70～120 kV、パルス幅20～100 ms、パルス数1～100パルスという撮像条件の設定ができる。もちろん、これらの設定は操作&画像表示パソコンで行うこともできる。



図22 電線用小型X線検査装置



実際の検査時には、パソコン画面上の操作で X 線を照射し、電線を透過した透過画像を FPD で検出し、その信号をパソコンに LAN ケーブルで転送して、画像表示ソフトを用いて、透過画像をパソコン画面上に表示する。

ここで、電線あるいは電線に似た線状の対象物に関しては図 22 の筐体を使用するが、それ以外の対象物に関しては図 23 のように穴の開いていない筐体を、適宜 X 線源部と組み合わせて、研究用に使用できる。このように筐体を交換することで、各種の対象物を検査でき、検査対象物の幅が広がる。実際、筐体の中には、幅 260 mm × 奥行き 80 mm × 高さ 170 mm サイズの対象物まで入れられる。この装置の筐体サイズは 270 × 270 × 180 mm で、重さは 20 kg と一人でも移動可能な装置<sup>9)</sup>である。

さらに X 線検査装置部は X 線の外部漏えい線量率を 0.6 μSv/h 以下に抑えるよう筐体に鉛遮蔽を施しており、X 線作業主任者資格なしで、研究所や事務所等でも電線やその他対象物の幅広い検査が可能になる。この装置なら小型軽量で移動し易く、装置を現場に持ち込んで電線やその他対象物を簡便に検査できる。

### 12.3 電線検査画像

この装置で管電圧 100 kV、50 ms、1 パルスの X 線を照射し、送電線を撮影した画像を図 24 に示す。

図 24 の透過画像では送電線の銅芯線とアルミより線部分を良好に撮影できている。このソフトは、各種の画像処理を施し、画面上でリアルタイムに拡大・縮小、ヒストグラム表示、明るさ・コントラスト等の調整が可能である。



図23 研究用小型X線検査装置



図24 送電線の画像

この装置に搭載している FPD は、デジタル出力であり、撮影結果を即座に表示することができ、容易に撮影条件を変えて、何度も対象物を撮り直して検査することができる。したがって、最適な撮影条件で対象物を検査することができ、欠陥部位の特定、腐食度合いの定量化等に効果を発揮する。また、この FPD の検出エリアは 10.2 × 15.3 cm、画素ピッチは 99 μm で、これは送電線の太さが 10 ~ 40 mm 程度であるので、その検査装置として実用範囲である。

### 12.4 自走式電線用小型X線検査装置

さらに我々は関東経済産業局のプロジェクトで図 25 のような自走式電線用小型 X 線検査装置を開発した。

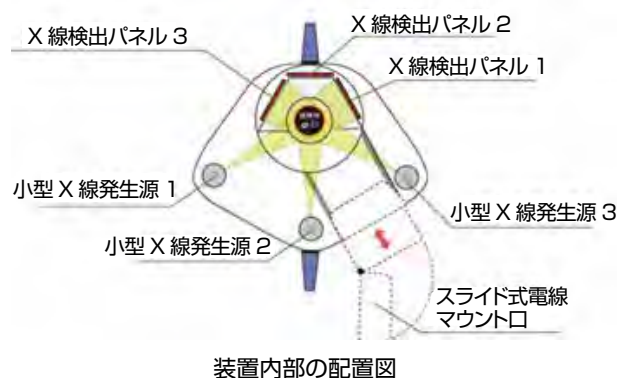
この自走式電線用小型 X 線検査装置は図 25 の装置内部の配置図のように装置下部と上部に小型 X 線発生源と X 線検出パネルが 3 セット対向して配置されている。これにより、送電線の全周を一度に撮影できるものとなっている。開発した装置は実際に電線メーカーの模擬配電線で自走試



配電線自走式検査試験風景



配電線 3 方向撮影画像



装置内部の配置図

図25 自走式電線用小型X線検査装置

験を行い、良好な結果が得られた。今後、実際の配・送電線での試験を試み、配・送電線検査を通じた電力インフラの保全へ貢献していきたい。この他、電力会社以外のつり橋のロープ検査、エレベーターのワイヤー検査等、応用分野を広げていく計画である。

### 13 おわりに

ここでは、レーザー超音波可視化検査装置と乾電池駆動小型 X 線検査装置の開発と応用について述べた。レーザー超音波可視化検査装置は社会インフラ、産業インフラのスクリーニング検査用途に導入が進みつつある。現在はさらに広く普及させるため、日本規格協会を通じてこの技術の標準化を進めている。その他、レーザー光源の国産化の取り組みを行っている。

また、乾電池駆動小型 X 線検査装置はここで述べた非破壊検査用途<sup>[10]</sup>以外に在宅医療用胸部レントゲン撮影用のポータブル X 線撮影装置<sup>[11]</sup>、また X 線源を 4 個搭載した照射ヘッドから 4 方向の X 線撮影を行い、トモシンセシス断層画像を表示できる装置の開発も行っている。このような取り組みを通じて、産業技術総合研究所の技術をつくばから世界に普及できるよう鋭意、努力している。

### 14 謝辞

本開発にあたり、産業技術総合研究所津田浩総括研究主幹、遠山暢之グループ長、鈴木良一首席研究員に多大なるご協力をいただき、ここに深く感謝申し上げます。

また、レーザー超音波可視化検査装置の開発に当たり、この研究の一部は、関東経済産業局戦略的基盤技術高度化支援事業受付番号 23130803009「電子部品・デバイスの内部欠陥をその場で非接触探傷できる革新的レーザー超音波検査装置の開発」、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構のイノベーション実用化ベンチャー支援事業交付番号 25 度新エネ技開第 0426001 号「現場用レーザー超音波可視化検査装置の実用化開発」、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:JST) の契約番号 B0201「レーザー超音波可視化探傷技術を利用した鋼橋の劣化診断技術の開発」によって実施されました。

さらに、乾電池駆動小型 X 線検査装置の開発に当たり、科学技術振興機構 A-STEP 実用化挑戦タイプ課題番号:AS2416903K「小型・軽量可搬型 X 線検査装置」、関東経済産業局戦略的基盤技術高度化支援事業受付番号 2630811040「電線欠陥検出用小型自走式 X 線検査装置の開発」、経済産業省および日本医療研究開発機構医工連携事業化推進事業採択番号 26-123「ポータブル 3D 表示

X 線撮影装置の開発・事業化」によって行われたことを記して謝意を表します。

### 用語の説明

用語: FPD (Flat Panel Detector) : X 線画像撮影装置で用いられる X 線平面検出器。

### 参考文献

- [1] 高坪純治: 励起用パルスレーザー走査法による三次元物体表面を伝わる超音波の可視化, *非破壊検査*, 57 (4), 162-168 (2008).
- [2] 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 王曉東: レーザー超音波可視化検査技術による溶接部欠陥エコーの可視化, *検査技術*, 20 (10), 67-69 (2015).
- [3] 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一: レーザー超音波可視化検査装置の原理と適用事例, *検査技術*, 22 (2), 16-20 (2017).
- [4] 鈴木良一: 乾電池駆動可搬型高エネルギー X 線装置の開発, *Synthesiology*, 2 (3), 237-243 (2009).
- [5] 齊藤典生, 王曉東, 松岡一夫, 王波: 単3乾電池駆動 X 線装置による電線用小型 X 線検査装置, *映像情報インダストリアル*, 46 (2), 41-46 (2014).
- [6] 齊藤典生, 王波, 王曉東, 安達健太郎, 于大選: 単3乾電池駆動小型 X 線装置の実用化, *映像情報インダストリアル*, 47 (2), 13-17 (2015).
- [7] 齊藤典生, 王波, 王曉東, 鈴木修一, 劉小軍: 乾電池でも駆動可能な省電力 X 線管を用いた小型軽量 X 線検査装置とその適用例, *非破壊検査*, 64 (5), 210-215 (2015).
- [8] 齊藤典生, 王波, 劉小軍, 鈴木修一: 小型 X 線検査装置, *検査技術*, 21 (3), 30-33 (2016).
- [9] 齊藤典生, 王波, 劉小軍, 鈴木修一: 冷陰極小型 X 線検査装置の開発と応用, *検査技術*, 21 (8), 59-62 (2016).
- [10] 齊藤典生, 王波, 劉小軍, 鈴木修一: 乾電池駆動小型 X 線検査装置の原理と適用事例, *検査技術*, 22 (1), 62-66 (2017).
- [11] 齊藤典生, 王波, 劉小軍, 鈴木修一: 在宅医療用乾電池駆動ポータブル冷陰極 X 線撮影装置の開発, *映像情報メディア*, 48 (13), 54-59 (2016).

### 執筆者略歴

王波(おうは)

1982 年中国西安電子科技大学レーザーシステム専攻卒業、1986 年同大学修士修了、助手、講師。1993 年筑波大学に留学、CT と MRI の画像処理研究。1999 年情報通信研究機構(NICT) と産総研にて、3D 画像処理と非破壊検査技術に関する研究。2005 年つくばテクノロジー(株)を起業、研究開発・経営全般を担当。第 6 回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。



高坪 純治(たかつぼ じゅんじ)

1973 年名古屋工業大卒、1991 年東京大学工学博士号取得。産総研にて 30 年以上にわたり、アコースティックエミッション、超音波探傷、レーザー超音波可視化技術に関する研究に従事。2011 年より産総研技術移転ベンチャーであるつくばテクノロジー(株)にてレーザー超音波可視化検査装置の開発・製品化に従事し技術全般を担当。第 6 回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。



齊藤 典生(さいとう のりお)

1985年山形大学大学院修士課程修了、国立公害研究所でミュー散乱レーザーレーダーの研究、その後、日本電気で高出力・高安定YAGレーザーの開発に従事。2012年よりつくばテクノロジーにて研究開発全般を担当。第6回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。



劉 小軍(りゅう しょうぐん)

1982年中国山東大卒。1992年留学。1999年筑波大学経営工学専攻の博士号取得。国土地理院、物質・材料研究機構(NIMS)と産総研にて、14年間数値計算、数値シミュレーションに関する研究。2005年つくばテクノロジー(株)を共同で起業し、管理・財務全般を担当。第6回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。



鈴木 修一(すずき しゅういち)

1992年日本大学卒。計測機器メーカーの計測開発部に20年間勤務。計測機器のハードウェア及びソフトウェア開発業務に従事。2012年よりつくばテクノロジー(株)にて製品化・製造全般を担当。第6回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。



## 査読者との議論

### 議論1 全体について

コメント(藤井 賢一:産業技術総合研究所)

社会インフラ、産業インフラの老朽化への対応は大きな社会問題であり、そのための新たな検査技術の開発を紹介したこの報告の価値は高いと思います。この報告ではレーザー超音波による可視化技術とカーボンナノチューブ構造体冷陰極X線による小型X線技術という二つの技術について紹介しています。

コメント(池上 敬一:産業技術総合研究所)

この報告は、ベンチャー企業がレーザー超音波可視化技術と小型冷陰極X線源技術という公的研究機関の技術シーズを用いて、それぞれ世界初となる2種類の非破壊検査装置を開発し事業化した事例を紹介しています。また、製品の訴求力である実用上の有効性についても、実証的に論述しています。技術シーズの事業化を構成学的に捉えるにあたって大変参考となる内容であり、本誌に掲載する十分な価値があるものと考えます。

### 議論2 レーザー超音波による可視化技術について

質問・コメント(藤井 賢一)

社会ニーズやこの技術の適用例等については詳しい記述がありますが、パルスレーザーの走査方法等についての詳しい記述はなく、3章に「格子状」と書いてあるだけなので、技術的な詳細が分かりません。

超音波伝搬の「相反定理」という専門的な概念についても説明がほしいところです。動画情報として可視化するための原理や方法等について説明すると、読者がこの技術の独自性を理解する上での助けになると思います。

回答(高坪 純治)

相反定理については、「3 可視化原理」という新しい項目を設けて説明させて頂きました。

### 議論3 カーボンナノチューブ構造体冷陰極X線による小型X線技術について

質問・コメント(藤井 賢一)

第8章にカーボンナノチューブ構造体冷陰極源の特徴についての記述がありますが、どうして一般のX線管で使用されている熱陰極電子源よりも有利なのかよく分かりませんでした。特に基板側が太いと、どうして電界の力に対する耐性が強くなるのかについて説明して下さい。

回答(齊藤 典生)

熱陰極電子源は、熱電子を放出させるために、予熱、待機電圧が必要で、その分の回路も必要になるので、装置全体が大型で重くなる傾向があります。それに比べ、冷陰極電子源は、電圧を加えたらすぐ電界電子が放出するので、即時照射で予熱、待機電圧が不要で、省電力かつ小型軽量になります。また、基板側が太いと、電界を受けて先端から少しずつ損耗しても基板側は太いので、影響を受けにくく、耐性が強くなります。

コメント(藤井 賢一)

第3章(可視化原理)を新たに設け、その中で図2(超音波伝搬の相反性)と図3(PZT-PZT送受信系とレーザー-PZT送受信系の相反性の比較)を新たに加えて超音波伝搬の相反性について解説したことで、測定原理が分かりやすくなりました。また、カーボンナノチューブ構造体を冷陰極源として用いた場合の特徴についても加筆した結果、その利点が分かりやすくなりました。今後もさらに小型化、軽量化等の改良を重ねることによって社会インフラ、産業インフラの老朽化への対応に貢献されることを期待します。

### 議論4 シナリオについて

質問・コメント(池上 敬一)

本誌が特に重視している「シナリオ」に関して、「産業技術総合研究所で開発された非破壊検査技術の中でレーザー超音波による世界初の可視化技術とカーボンナノ構造体冷陰極X線による小型X線技術をもとにして」との記述がありますが、特にこの二つの技術に着目された際の考え方や経緯はどのようなものでしたか。

回答(王 波、高坪 純治、齊藤 典生)

レーザー超音波に関しては、従来の超音波検査技術にない優れた特長(①動画映像で見るので素人にも分かりやすい②非接触走査なのでどのような複雑形状物体でも検査できる③ミラーによる高速走査なので広い範囲を迅速に検査できる)を有していることから、新しい検査フィールドを開拓できると考え、可搬型で操作性の良い実用機の製品化に取り組みました。その前提には、「現在の非破壊検査装置で検査できているのは検査したい場所の1~2割程度に過ぎない、検査できるところだけを検査しているだけである」という検査市場の声を聞いていたからです。

カーボンナノ構造体冷陰極X線に関しては、検査対象物の経年変化や腐食、損耗を小型軽量で、現場に持ち込んで、その場で検査したいというニーズがありました。そこで、もともと光源用に開発していたカーボンナノ構造体をX線管の冷陰極電子源として組み込んでみたところ、実用レベルのX線出力に成功し、さらに熱陰極と比べて、小型・軽量で、予熱がいらない、待機電圧がいらない、即時照射できる、乾電池で駆動できるほど省電力で、寿命が長いなど数々の利点がありました。

### 議論5 困難を乗り越える際の考え方

質問・コメント(池上 敬一)

ベースとなる技術を産業技術総合研究所からの技術移転で得たとしても、それだけで市場に受け入れられる製品の開発を成し遂げられたということはないでしょう。例えばレーザー超音波可視化検査装置の場合、レーザーや圧電受信センサ等の部品は、公的研究機関に

おける研究では性能一辺倒の選択になりがちですが、事業化においてはコストとの見合いの中で最適なものを選択し組み合わせる必要があったものと推測します。その過程において生じた困難、またその困難を乗り越える際の考え方や経緯はどのようなものでしたでしょうか？

回答 (王 波、高坪 純治、齊藤 典生)

レーザー超音波検査装置の開発では、レーザー照射、ミラー走査、波形集録の同期精度の向上や信号計測時の電気雑音の低減、および測定映像からの欠陥エコーの抽出アルゴリズムの開発に時間を取られました。一方で、性能や精度を向上させればコストが上がってしまうというジレンマがあり、ユーザーの希望する性能・精度を満たしながらいかに安い、軽い、小型、丈夫な製品を作るかに苦労しました。

カーボンナノ構造体冷陰極 X 線に関しては、カーボンナノ構造体冷陰極電子源、それを組み込んだ冷陰極 X 線管、それを乾電池で駆動する回路等、それらすべてが世の中にないもので、世界で初めて取り組んだため、試行錯誤および試作と実験を繰り返して、知見を積み重ねながらの挑戦の連続でした。その知見により、低い管電圧からより高い管電圧へなど実用化に向けて開発を進めました。

#### 議論6 電池駆動小型 X 線検査装置における超低損失多段昇圧回路について

質問・コメント (池上 敬一)

電池駆動小型 X 線検査装置においては、超低損失多段昇圧回路の開発が、一つの壁ではなかったかと推測します。配管検査用であれば、(X 線源から 20 m 離すことのできる) コントローラ側に大きめの電源を用意するという選択肢もあったのではないかと思います。あくまで電源も含めた小型化にこだわられた際の考え方や経緯はどのようなものでしたか。また、昇圧回路の開発に大きな困難は伴わなかったのでしょうか。

回答 (王 波、齊藤 典生)

そもそも電池駆動小型 X 線検査装置は、プラント配管の狭い隙間に入るような小型で軽量の線源が求められて開発を進めました。さらに小型軽量でありながら、現場で使えるよう AC100 V 電源がなくても乾電池や実用上はバッテリーで駆動することが求められました。それにより、昇圧回路も乾電池 1 本の 1.5 V 前後から 60 kV ~ 100 kV 程度まで昇圧できるよう多段にして、所望の管電圧を得よう何回も試作と実験を繰り返して、超低損失多段昇圧回路を実現しました。

#### 議論7 新たな事業領域への取り組み

質問・コメント (池上 敬一)

自走式電線用小型 X 線検査装置の開発にあたっては、軽量化と全周を一度に撮影するために線源と FPD を 3 セット設置することとが二律背反になりかねなかったと思います。昇圧回路の新規開発は、その困難を乗り越える方策の一つだったと推測しますが、他にも部品の選択等で新たに取り組まれたことはありましたでしょうか？ また、自走機構は従来からの御社の事業領域とは異なる領域に属すると思いますが、開発に際し大きな困難は伴わなかったのでしょうか。

回答 (齊藤 典生)

自走式電線用小型 X 線検査装置の開発にあたってはまずカーボンナノ構造体冷陰極 X 線管そのものの小型化を何年かかけて進めました。また、検出器も既存の物では大きくなるので、検出素子単体を 3 枚入手し、検出回路を独自開発するのに苦労しました。それらにより 3 セットでも全体を小型化することができ、また回路も新規開発により、3 セットを小型ながら効率的に駆動できるものとなりました。自走機構については、新たなチャレンジの部分もあり、駆動トルクによる小型ながら最適モーターの選定、走行時の確実なコントロール等のため模擬電線を社内に作り、それに装置をのせて、実験しながら完成させました。