

ISSN 1882-6229 (Print) ISSN 1882-7365 (Online)



振動計測の信頼性と国際同等性の確立について

熱電発電の実用化に向けた高効率化と毒性・希少元素代替

世界初非破壊検査装置開発へのチャレンジ

時計遺伝子研究から認知症の解決を目指して

シンセシオロジー編集委員会





## Synthesiology 論文のポイント

本誌は、成果を社会に活かそうとする研究活動の目標と社会的価値、具体的なシナリオや研究手順、また要素技術 の構成・統合のプロセスを記述した論文誌です。本号論文の価値が一目で判るように、編集委員会が作成したシンセシ オロジー論文としてのポイントを示します。

シンセシオロジー編集委員会

#### 論文:振動計測の信頼性と国際同等性の確立について

- 振動・加速度・衝撃計測標準の国家標準開発および関連技術の開発と国際比較の歩み- 臼田 孝ほか

機械的振動の計測や関連する加速度・衝撃計測の国家標準を確立するために、信頼性の高い校正技術の開発と平行して 各国の計量標準機関が協力しながら国際比較を行い、対象とする周波数範囲を順次 0.1 Hz ~ 10 kHz に拡大していった、 1995 年から 20 年以上に亘る展開を詳述する論文である。

#### 論文:熱電発電の実用化に向けた高効率化と毒性・希少元素代替

### -未利用熱エネルギーの革新的活用に向けて- 太田 道広

未利用熱エネルギーの利用に向けて熱電発電技術の普及を目指し、国内外の研究機関と共同しながら、独自の材料開発 からモジュール化を経て社会実装に至る、著者の一貫した研究戦略を論述している。単なる技術開発に留まらず、ベンチャー 創業や評価方法の標準化にも踏み出している。

#### 報告: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 波ほか

レーザー超音波可視化技術と小型冷陰極X線源技術という産総研発の技術シーズを用いて、ベンチャー企業がそれぞれ 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報告する。社会インフラや産業インフラへの利用拡大を 目的として、製品開発を継続すると共に、標準化にも取り組んでいる。

#### 論説:時計遺伝子研究から認知症の解決を目指して

#### -国立研究所30年の総括- 石田 直理雄

30年に及ぶ著者の生物時計についての遺伝子レベルの研究展開を経時的に紹介する論説である。ショウジョウバエを主 な対象とする遺伝子研究が、どのようにして哺乳類の時計遺伝子の、ひいては、人の疾患研究につながってきたのかを、 背景にある研究コミュニティとの関係も含めて、詳述している。

## Synthesiology 第10巻第2号(2017.9) 目次

#### 論文のポイント i 研究論文 振動計測の信頼性と国際同等性の確立について — 振動・加速度・衝撃計測標準の国家標準開発および関連 50 - 62技術の開発と国際比較の歩み — ・・・臼田孝、大田明博、野里英明、穀山渉 熱電発電の実用化に向けた高効率化と毒性・希少元素代替 — 未利用熱エネルギーの革新的活用に向けて — 63 - 74 ・・・太田 道広 報告 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 ---75-86 ···王 波、高坪 純治、齊藤 典生、劉 小軍、鈴木 修一 論説 時計遺伝子研究から認知症の解決を目指して — 国立研究所 30 年の総括 — ・・・石田 直理雄 87 - 99 編集委員会より 編集方針 100 - 101 投稿規定 102 - 103 編集後記 108 「Synthesiology」の趣旨 **Contents in English** Research papers (Abstracts) Establishing reliability in vibration measurement and its international equivalency—Development of 50 national metrology standards for vibration, acceleration, shock measurement and progress on international comparisons---- T. USUDA, A. OOTA, H. NOZATO and W. KOKUYAMA High performance thermoelectrics for power generation using earth-abundant and low toxicity elements 63 -Toward developing an innovative waste heat recovery system---- М. Онта Report (Abstract) Challenges to the development of the world's first nondestructive inspection system-Development of an 75 inspection system with laser ultrasound and a cold cathode X-ray source---- B. WANG, J. TAKATSUBO, N. SAITO, X. LIU and S. SUZUKI Article (Abstract) Toward overcoming neurodegenerative disease by the circadian molecular clock study-My 30 year history 87 --- N. ISHIDA in a national institute-Editorial policy 104 - 105 Instructions for authors 106 - 107 Aim of Synthesiology

# 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>11</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にしてい 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



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)

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わ 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



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なくても分かり易い。
- 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。
- 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)

図10 き裂を有する碍子

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

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隙間が 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、配管と配管の隙間に入れて X 線照 射できる装置<sup>18</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、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1mm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34mm、肉厚6.8mm、突起部の減肉深さ1.8mmであっ た。撮影時の条件は管電圧140kV、管電流1mA、パル ス幅100ms、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: 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21 配管の寸法表示例



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の 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



図25 自走式電線用小型X線検査装置

- 83 -

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, 王暁東: 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, 王暁東, 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, 王暁東, 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, 王暁東, 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 カル, 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ダーシス 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年間数理計算、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が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

- 85 -

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行い、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われます が、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な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、所望の管電圧を得るよう何回も 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しました。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。