

2021

試験・検査・評価・診断・寿命予測の専門誌

10

Vol.26 No.10

特集：溶接部検査で活用される製品と技術
製品ガイド：渦流・漏洩磁束検査機器

検査技術



検査技術
オフィシャルサイト

Inspection Engineering

発行：日本工業出版

<https://www.nikko-pb.co.jp/>

OLYMPUS

工業用ビデオスコープ



現場での **密回避**・遠隔地からの **リモート検査立ち会い**
より安全で効率的な内部目視検査を実現!

現場



インターネット経由で映像を送信
※オプション品等必要な場合がございます
詳細はお問い合わせください



オフィス



現場での密回避に!

本体から離れた場所で映像を確認。
同じ画面を覗き込む必要がありません。
スマートフォン・タブレットでも静止画や動画の撮影が可能です。



遠隔地から検査に参加

Web 会議システムを使用することで、検査中の映像をオフィスから確認することができます。



スマートフォンや
タブレットで
映像を確認することで、
密回避に貢献します。



デモ動画で紹介!

<https://bit.ly/3dxMtg5>



工業用ビデオスコープ
無料お試しキャンペーン実施中!
<http://bit.ly/3rPm6a6>

※ 注意事項についてはお申し込みフォームをご確認ください



検査機器

超小型X線CT装置

Super Small X-ray CT System

超小型で、高精細に、現場でCT撮影を実現するX線CT装置

つくばテクノロジー(株) 齊藤 典生・王 波・劉 小軍・鈴木 修一

1. はじめに

X線装置は食品検査など身近なものからプラントの配管検査など幅広く利用されている。特に、一方向撮影だけでなく、病院での検査でも使われるCT装置がより精密な検査手法として、欠かせないものとなっている。これは工業用途でも同じで、CT画像、さらにそれをもとに3D表示することで、精密な検査が実現できる。

ただ、このようにCT装置の有用性は間違いないが、一般にCT装置は大きく、重く、また、高価で、それを移動して、現場で対象物のCT撮影をすることは難しい。

当社は独自のカーボンナノ構造体冷陰極X線技術を実用化して、自社で工業用X線検査装置を開発、販売している⁽¹⁾。

我々は、単3乾電池1本で駆動可能な冷陰極小型X線検査装置^{(2)~(7)}をもとに、今までのCT装置の概念とは違う、CT装置を超小型で、撮影場所に持ち込み、その場で、CT撮影できる全く新しい「超小型X線CT装置」を開発した。

本稿では、その装置と検査例、撮影例について紹介する。

2. 冷陰極小型X線装置

一般に大きく、重く、連続照射で漏洩も小さ

くない熱陰極X線装置に対して、我々の装置は小型・軽量で省電力、パルス照射で漏洩が抑えられる冷陰極技術のX線装置である。

冷陰極X線装置のX線管は、電子源が産業技術総合研究所で研究されたカーボンナノ構造体になっている。その電子源を搭載した冷陰極小型X線管を写真1に示す。

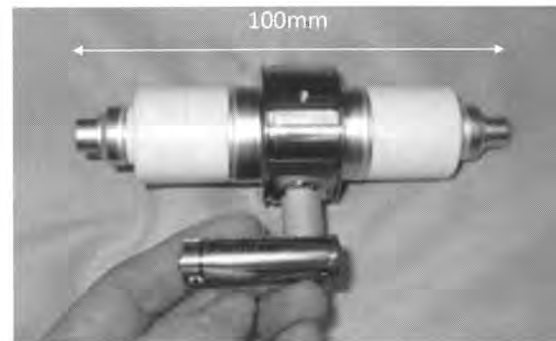


写真1 カーボンナノ構造体電子源を搭載した冷陰極X線管

このX線管を搭載したX線装置は様々改良を進め、60kV、130kV、150kV、180kVをラインナップしている。

当社は、カーボンナノ構造体電子源およびそれによる冷陰極X線管を設計、開発して、それを組み込んだ小型・軽量・省電力かつパルス照射で漏洩の少ないX線装置を販売している。

3. 原位置デジタルサンプリング法

写真2の左側は、GPサンプラーと呼ばれる砂礫を乱さない試料を採取する特殊な採取機で、実際に地盤試料の土をボーリングして、実物の土を持ち帰り、調査する方法だが、右側は、デジタルサンプリング法と呼ばれる新しい方法で、掘削してきた土のサンプルをCT装置で撮影し、そのデジタルデータをもとに3Dプリンタで疑似供試体を生成し、地盤を評価する方法である⁽⁸⁾。

さらに我々は、このデジタルサンプリングを現場＝原位置で行う「原位置デジタルサンプリング法」⁽⁹⁾を、港湾空港技術研究所、基礎地盤コンサルタンツと一緒に目指して、現場に装置を持ち込み、CT撮影できる「超小型X線CT装置」の開発に至った。

こうすることで、現場から実物の土サンプルを持ち帰らず、CT撮影したデジタルデータだけを持ち帰り、そのデータを基に3Dプリント供試体を生成することで、実物と同じ地盤調査を成し遂げようとするものである。

この方法なら、国内の地方や離島などはもちろん、海外、さらには宇宙の天体においても、当社の超小型X線CT装置により、現場で3Dデ

ータを取得できれば、その地盤調査が可能となる画期的な手法と考える。

4. 超小型X線CT装置実現に向けて

この原位置デジタルサンプリング法⁽⁹⁾実現のため、必須の超小型X線CT装置実現に向けて、まず、第一段階として、第1図のように、当社既存の冷陰極X線源と高精細デジタル検出器を組み合わせ、ラボ内でΦ10cmコア（円柱土質サンプル）のCT撮影実験を試みた。

ここで、独自技術である冷陰極X線装置は、陰極からの電界放出により電子が放出されるため、今までの熱陰極X線装置とは違い、フィラメントなし、予熱・エージングなしで、瞬時にX線を発生する。従って、CT撮影したい時にすぐX線を照射でき、撮影の効率化に寄与する。

この実験は、第1図(a)のように装置を配置し、Φ10cmコアに対して、管電圧:140kV、管電流:1mA、パルス幅500msとし、検出器は、撮影サイズ:15cm×15cm、分解能:127μm、画素数1,152×1,152とし、撮影距離は240mmで、装置の下に設置した回転テーブルにより、全周を1度ごとに360枚撮影した。

これにより、撮影した画像を第1図(b)に、再

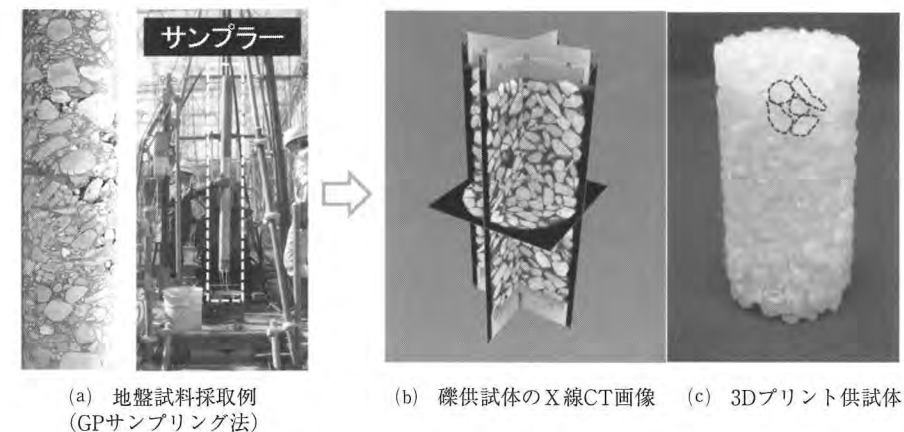
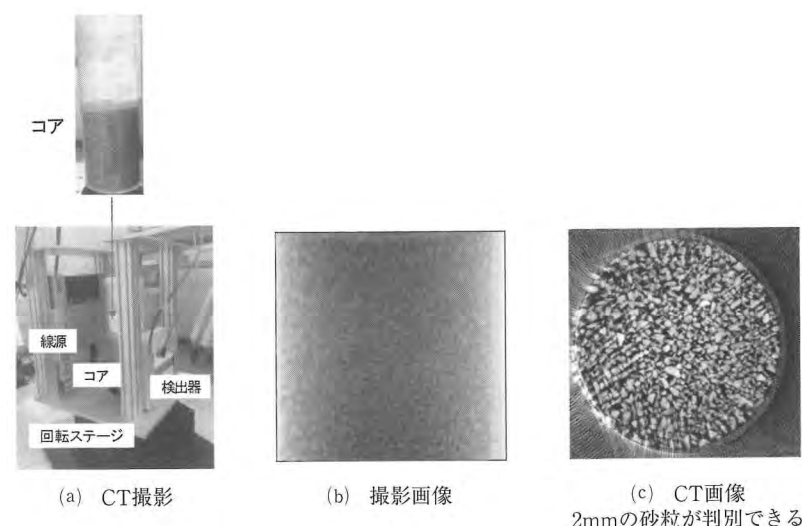


写真2 原位置デジタルサンプリング法
(出典: matsumura et al.⁽⁸⁾ (2017) を加筆・修正)



第1図 Φ10cmコアCT撮影実験 (2017年度)
 <撮影条件> 管電圧: 140kV、管電流: 1mA、パルス幅: 500ms、
 撮影サイズ: 15cm×15cm、分解能: 127μm、画素数: 1,152×1,152
 距離: 240mm、全周1度ごと360枚撮影

構成したCT画像を(c)に示す。このCT画像より、コア内部の2mmの砂礫がはっきりと境界部分まで判別できた。

これは、当社装置によりφ10cmのコアを十分に透過した画像を撮影できたことを証明している。これにより、超小型X線CT装置の実現を確認でき、原位置デジタルサンプリング法⁽⁹⁾への道ができた。

5. 既存装置による現場CT撮影実験

次に、我々は、原位置デジタルサンプリング法⁽⁹⁾への第二ステップとして、現場でのCT撮影を実証するため、Φ10cm 長さ80cmのコアに対する現場CT撮影実験を試みた。その際の様子を写真3に示す。

この時は前年ラボ実験に用いた装置一式を現場実験室に持ち出し、1周だけでなく、長さ80cmすべてに対して、360度を撮影した。それは、コア長さ80cmに対して、連続CT画像を得るため、長さ7cmごとに高さを変えて、12周撮影した。

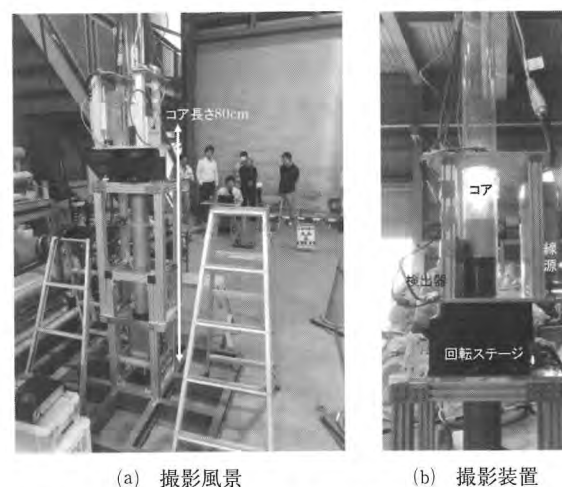
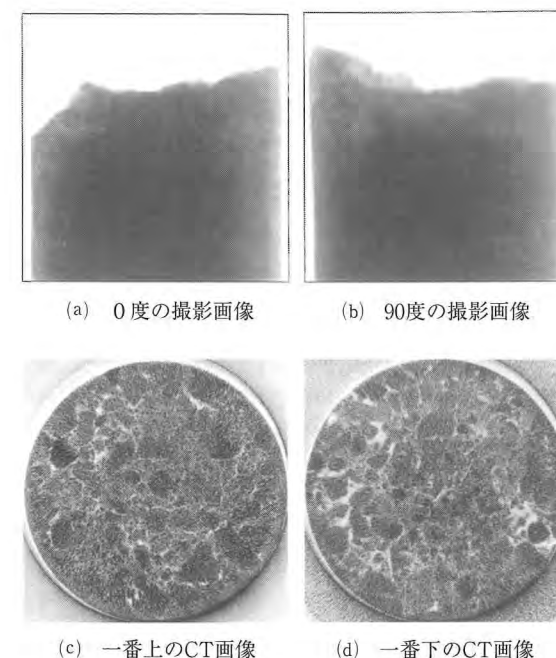


写真3 Φ10cm、長さ80cm、現場CT撮影実験 (2018年度)
 撮影時間: 80cm全体を撮影するため、1周360枚を、12周で4,320パルスを10秒ごとに連続照射撮影。

それにより、撮影としては、80cm全体を撮影するため、管電圧: 135kV、管電流: 2mA、パルス幅: 56msで、10秒ごとに1パルス照射し、2日間で4,320パルスを連続的に照射し、撮影することとなった。この時の撮影画像とCT画像を第2図に示す。

これらにより、コアの良好な透過画像と精緻



第2図 Φ10cm 長さ80cm 撮影画像(上)およびCT画像(下)

なCT画像が得られ、コア中の一つ一つの砂礫の状態が確認できた。以上で、本実験による現場での360度撮影、およびそのCT画像が実用レベルであることが確かめられた。

6. 超小型X線CT装置

以上の取り組みの結果をもとに、原位置デジタルサンプリング法⁽⁹⁾のための超小型X線CT装置を設計、開発した。

その装置を写真4に、その仕様を第1表に示す。この第1表のように管電圧は90~120kV、管電流は0.5~1.0mA、パルス幅は50~500msと可変でき、各種対象物を最適な条件で撮影できる仕様となっている。

この装置は、写真4のようにカバーが透明アクリルで内部が見える。実際に装置として供する場合は、鉛をカバーに貼り付け、X線を遮蔽する。

この装置で一番のチャレンジは当社のX線源が今まで四角かったのが、写真4で白く見える

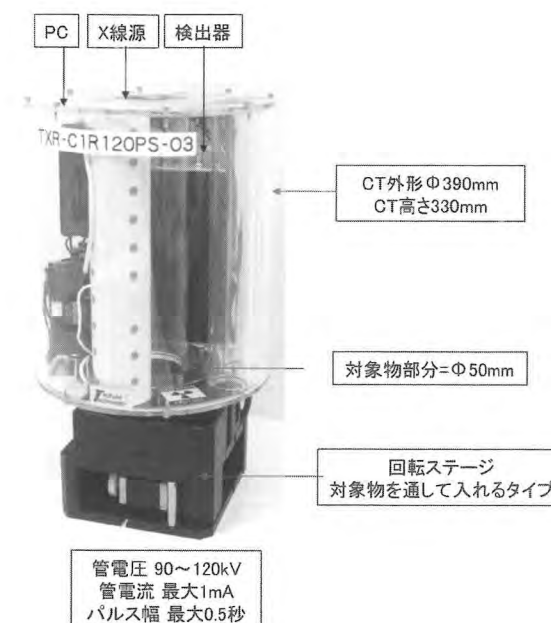


写真4 Φ390mm 超小型X線CT装置 (2019年度)

第1表 超小型CT装置の仕様

項目	仕様値
管電圧	90~120kV
管電流	0.5~1.0mA
パルス幅	50~500ms
X線管	冷陰極式
実効焦点サイズ	1mm
撮影距離	約120mm
本体サイズ	Φ390×H330mm
本体質量	約20kg
回転ステージ	360度
電源	バッテリー

ように、約Φ60mm、長さ約300mmの白い円柱とした。これにより、本体サイズΦ390mmの中にX線源を収め、360度CT撮影することに成功した。これも冷陰極X線源ならではの長である。

また、装置として、サイズがΦ390×H330mmの中にX線源と検出器さらにPCとバッテリーを搭載し、重量が約20kg、試料の最大直径は70mmまでのコアを撮影可能で、撮影したい場所に移動でき、バッテリー駆動で、現場でCT撮影し、CT画像を再構成して、その場で詳細な欠陥解析や良否判定の検査ができる画期的な装置となっている。この装置は当社の冷陰極X

線でなければ実現不可能と考える。

さらに、この超小型X線CT装置の性能を最大限発揮させるために、最適なデジタルフラットパネル検出器を組み合わせた。その仕様を第2表に示す。

第2表 検出器の仕様

項目	仕様値
方式	CMOS
ピクセルエリア	145mm×115mm
ピクセル数	1944×1536
ピクセルピッチ	74.8 μ m
フレーム数	14fps
A/D変換	14bit
重量	2.2kg
全体サイズ	W150×H223×D42mm

この検出器は、 Φ 390mmに収まるようW150×H223×D42mmの長方形タイプを縦長に配置した。また、何よりピクセルピッチが74.8 μ mで、デジタルFPDでも最高に近い分解能である。それにより、コアの砂礫を高精細に撮影し、CT画像を高分解能で再構成できる。

7. 超小型X線CT装置による検査例

次にこの装置による実際の検査例として、本

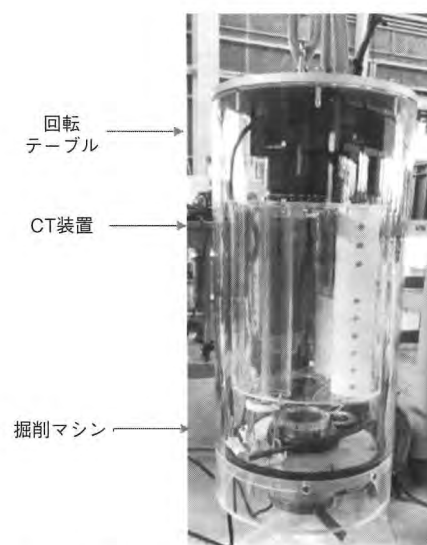


写真5 掘削マシンドッキングテスト (2020年6月)

CT装置を掘削マシンに搭載してドッキングテストした際の様子を写真5に示す。

この写真は、地盤を掘削しながら掘り進むため、掘削マシンが一番下で、その上に当社の超小型X線CT装置が逆さまに取り付けられ、装置回転用の回転テーブルが一番上に配置されている。

この状態で地盤を掘削しながら、その中心で、 Φ 70mm以下のコアを地中でCT撮影しながら、進んでいくというものである。

ここで、撮影は地中なので、X線を照射しても漏洩は最低限に抑えられ、安全性は担保されと考える。また、この装置で、掘り進みながらコアのデジタルデータさえ収集できれば、これらマシンを取り出して、コアそのものは、持ち帰ることが必要なくなる。

実際の撮影はこの装置を制御するPCが地上にあり、CT撮影を指示し、X線の照射から、検出器のデータ収集まで、一連の操作を実施し、検出器から受信したデータをPCに保存し、得られた1周360枚の撮影画像からCT再構成する。このPC画面の360度CT撮影ソフトを写真6に示す。

ここでは、X線源と検出器により、管電圧120kV、管電流0.9mA、パルス幅0.3s、周期10秒、距離14cmの撮影条件で、写真6のように



写真6 360度CT撮影ソフト
 <撮影条件>管電圧:120kV、管電流:0.9mA、パルス幅:0.3s、
 周期:10秒、距離:14cm

Φ 5cmのコアを撮影した。

ここで、写真6を見ると、 Φ 5cmのコア全体が正確に画角に収まったX線透過像が撮影されている。これを360度全周撮影した画像をもとに、当社アルゴリズムでCT画像を再構成する。それらCT画像により、地盤を高精度に調査できる。

8. 超小型X線CT装置による撮影例

最後にこの装置で360度撮影した撮影例を第3図に示す。第3図左が実物の Φ 5cm砂礫コアで、右がそのCT画像である。この第3図から、(a)の実物と(b)のCT画像を見比べると、砂礫一つ一つが高精度に再構成されていることがわかる。

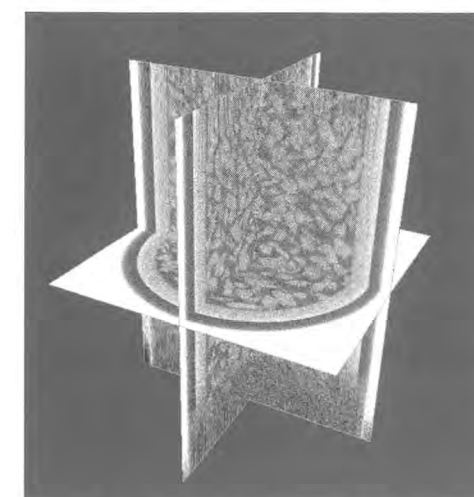


(a) 実物 (b) CT画像
 第3図 Φ 5cm砂礫コアの実物とCT画像
 (被写体:アルミニウム製パイプ、外形66mm、肉厚5mm、
 2~5mmの礫粒子)

次に、第4図に、そのCT画像をもとにした3D表示画像を示す。この第4図を見ると、横方向だけでなく、縦方向も高精度に砂礫一つ一つの形状や積層構造が再構成できている。これにより、原位置デジタルサンプリング法⁽⁹⁾に供する「超小型X線CT装置」の原位置でのCT撮影が実証できた。

以上より、本装置を用いれば、撮影したい場所に、装置を持ち込み、その場でX線照射のスイッチを押し、360度撮影して、撮影画像はPCに送られ、PC上でCT再構成し、その場で地盤調査ができる。

その際、CT画像のスライス厚さを自由に設



第4図 Φ 5cm砂礫コアの3D表示画像
 <撮影条件>管電圧:120kV、管電流:0.9mA、パルス幅:0.3s、
 距離:14cm

定できる。また、3D表示すると、横方向だけでなく、縦方向も再構成され、実物に近い状態で直感的にその場で調査を行うことができる。

9. おわりに

本稿では、原位置デジタルサンプリング法⁽⁹⁾に供する超小型X線CT装置とその装置による実際の検査例、撮影例について紹介した。この装置は、現在、土槽での実験に向けて改良を進めている。

また、地盤コア以外に、CT撮影の対象となる、配管、電線、電柱、煙突などのニーズに対しても、実際の対象物を想定した装置、および実証実験に向けた検討を進めている。

つまり、ここでは地盤の砂礫コア調査の例を述べたが、本装置の応用と考えられる円柱状の対象物として、例えば、配管を考えると、保温材付き配管のCT撮影を実施すれば、そのCT画像から、配管の減肉があるかないかだけでなく、減肉の場所、その寸法、そのサイズ、形まで、詳細に検査することが可能になる。

これは、今までの現場X線検査でフィルムやデジタルパネルで、2次元画像が普通だったの

に対し、本装置なら現場の保温材付き配管で3D検査できるという新しい応用を提案するものである。それにより、より詳しい腐食解析や予防保全を可能にする。また、AIによる自動判定技術も組み合わせれば、より効率的な検査まで可能になる。

この他、この装置の応用として、異物検査や手荷物検査などで、CT画像による異物、危険物の位置、サイズ、形をより正確に把握することが期待される。

現在、このような各種応用も視野に入れて、超小型X線CT装置の実用化への道筋を進めているところである。これにより、今まで不可能だった検査を可能にし、更なる安全・安心の向上に鋭意貢献していきたい。

【謝辞】

本成果は、当社と(国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所様および基礎地盤コンサルタンツ(株)様の「原位置デジタルサンプリング法の開発と3Dプリントされた疑似供試体による地盤特性の新たな評価方法の確立」の共同研究による成果であり、以下の関係各位に謝意を表します。

- ① (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所様
- ② 基礎地盤コンサルタンツ(株)様
- その他、以下の関係各位にも謝意を表します。
- ③ 立命館大学(小林泰三)様

<参考文献>

- (1) 齊藤典生・松岡一夫・王波：“現場用リアルタイムX線検査装置の開発”、検査技術、19(1)、pp.70-73 (2014)
- (2) 齊藤典生・王波・劉小軍・鈴木修一：“小型軽量X線検査装置”、検査技術、21(3)、pp.30-33 (2016)
- (3) 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)、pp.59-62 (2016)
- (4) 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)、pp.62-66 (2017)
- (5) 齊藤典生・王波・劉小軍・鈴木修一：“ドローンによるX線検査”、検査技術、24(4)、pp.72-76 (2019)

- (6) 齊藤典生・王波・劉小軍・鈴木修一：“小型X線検査装置”、配管技術、61(4)、pp.74-77 (2019)
- (7) 齊藤典生・王波・劉小軍・鈴木修一：“可搬型X線断層検査装置”、検査技術、26(3)、pp.42-47 (2021)
- (8) S.Matsumura, T.Kobayashi, T.Mizutani and R.Bathurst, “Manufacture of Bonded Granular Soil Using X-Ray CT Scanning and 3D Printing”, Geotechnical Testing Journal 40, No.6 (2017) : 1000-1010.
- (9) 松村聡・近藤明彦・水谷崇亮・小濱英司・小林泰三・米岡威・武政学・齊藤典生：“X線CT技術を利用したデジタル地盤工学への挑戦”、第55回地盤工学研究発表会、[DS-1-13] (2020.7.22)

【筆者紹介】

齊藤 典生

つくばテクノロジー(株)

取締役 兼営業部長

<主なる業務歴および資格>

1985年山形大学大学院修士課程修了、国立公害研究所でミエ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年より現職。第6回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。



王 波

つくばテクノロジー(株) 代表取締役社長

<主なる業務歴および資格>

第6回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。

劉 小軍

つくばテクノロジー(株) 取締役CFO 兼総務部長

<主なる業務歴および資格>

第6回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。

鈴木 修一

つくばテクノロジー(株) 常務取締役

兼開発・製造部 部長

<主なる業務歴および資格>

第6回ものづくり日本大賞優秀賞受賞。

<会社の主な事業内容>

- ・レーザー超音波可視化検査装置の開発、製造、販売
- ・小型X線検査装置の開発、製造、販売
- ・個人線量計の開発、製造、販売
- ・AE、光ファイバー検査装置の開発、製造、販売
- ・その他非破壊検査装置の開発、製造、販売