

# 特集

P 0707-08  
1342-9825/07#500/論文/JCLS

## 自動車産業に貢献する検査機器

### X線透過法とCTによる内部検査

東芝ITコントロールシステム㈱ 藤井 正司

#### はじめに

自動車は極めて広い産業分野に関連しているため、そこで使われる非破壊検査手法もX線、超音波を初めとして全ての技術が応用されている。X線による内部検査は当初、鋳造部品のキズを加工前の素材段階で検査することが主流であった。しかし、技術革新が進み、走行性能はもとより、安全性の向上、燃費改善、環境性能の要求の高まりに伴い、軽量化、高機能化に関連する検査要求が強まった。

最近の自動車は機械的な要素に加えて、センサや電子的な制御、及び電子情報システムの取り込みが大きな技術課題になっており、電子部品の固まりとも言われる。それらを反映してX線応用技術は鋳造品、電子部品、樹脂系部品等の検査に広がるとともに、検査から一歩進んだ“もの作り”の源流にまで応用されるようになった。

これらを反映してX線応用技術は自動車産業の様々な対象や工程で使い分けられている。ここでは最も自動車分野に普及しているX線透視法とX線CT (Computed Tomography) について述べる。

#### X線応用技術

自動車は進む(駆動)、停まる(制動)、曲がる(操舵)の3つの能力が必要であるが、現在では安全性と環境性が大きくクローズアップされ、これを抜きにしては議論が出来ない。安全性一つとっても、危険の予測・検知、衝突回避、衝撃軽減などがあり、ハードウェアはもとよりセンサ技術とこれを判断・制御する計算機とそのソフトウェアの重要性が高まっている。更に安全性とも関連して、車両の運転しやすさ(ドライバビリティ)の向上も重要度を増している。このことから、自動車を構成する機構部品と電子部品のそれぞれについて信頼性の確保が必要になる。自動車は開発・試作、生産準備、品質管理、事故解析等の段階があるが、X線による内部検査の技術はその工程に応じて使い分けられている。第1表にその工程とX線検査手法の相関をまとめた。量産に入った段階ではインライン検査が望まれることが多いが、他の工程では高精度の解析が可能な3次元情報を提供できる手法が適している。インライン検査ではX線透視が主として用いられ、3次元・高精度解析が要求される場合はX線CTを用いる。ここで、3次元とはCTの連続断面画像から得られる3次元画像情報を指す。

CRはComputed Radiographyの頭文字を取った

第1表 自動車に使われるX線内部検査手法

	開発・試作	生産準備	品質管理	事故解析
各工程で期待される能力	3次元情報化 高精度解析	3次元情報化 高精度解析	インライン検査 抜き取り検査	3次元情報化 高精度解析
CT			インライン 抜き取り	
透視(透過)	○	○	インライン 抜き取り	○
CR(X線フィルム)	○	○	インライン 抜き取り	○

最適 ○使用可能 限定的もしくは不可

ものである。従来のレントゲンフィルムのかわりにX線画像を蓄積記録できる輝尽性蛍光体を塗ったイメージングプレートを用いる。X線照射後にレーザ光でプレートをスキャンして記録されたX線画像を読み取り、コンピュータでデジタル画像を得る装置である。物体の厚さの変化に対するダイナミックレンジが広い特徴を生かして、フィルムの置き換え用途に使われている。

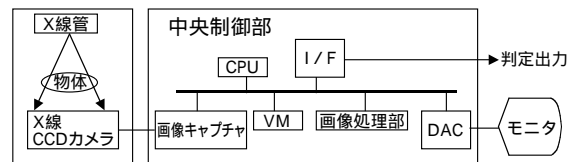


写真1 TOSMICRON-S5000シリーズ

## X線透視装置

X線透視はレントゲンフィルムで撮影するように、物体の2次元画像を得るシステムである。3次元の物体を2次元の画像に写し込むために、X線透過方向の物体情報が重なって映ることになる。注目する画像が他の構造に影響されてある程度劣化するが、効率良く検査や解析ができる特徴がある。X線透視装置は2次元の検出視野を持つエリアセンサを用いるものと、1次元の広がりを持つラインセンサを用いる方式がある。そのなかで、最も普及しているシステムはX線イメージンシファイヤ(X線 )とCCDカメラの組み合わせによるエリアセンサを用いた装置である。装置外観を写真1に、構成を第1図に示す。

物体を透過したX線は、X線 で可視光に変換・増幅した後CCDカメラで撮像する。映像信号は画像キャプチャでAD変換(Analogue to



第1図 X線によるデジタル透視システム

Digital Conversion) した後、画像メモリに記憶する。デジタル化された信号に対して画像を改善するためにX線量子ノイズを整形化する画像積分、輪郭強調を行うための空間フィルタリング、及びX線の不均一分布やセンサの感度ムラを除去するためのシェーディング補正等が行われる。標準的にAD変換は640×480画素、階調8ビットから12ビットで行うが、より高い空間分解能を要求する場合はCCDカメラを含めてHDTV(High Definition Television: 通称ハイビ

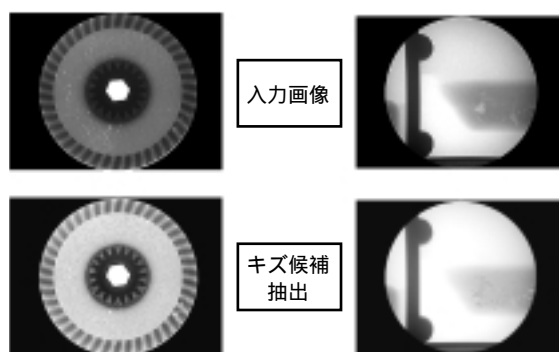
## (3)...X線透過法とCTによる内部検査

ジョン)クラスの画素数を適用する。画像メモリは画像積分を行うために階調方向16ビットの深みとする。画像表示は肉眼と画像表示装置の階調分解能に合わせるために、中心輝度とコントラストを調整するウインドウ処理を行ってから表示する。

X線の入力視野は2から16インチの範囲で段階的に設定されている。検査する物体の材質、外形寸法、検査目的に応じて視野を選定する。X線装置はX線管の加速電界10から450kVまで段階的に製作されているので、X線IIと同様に検査条件に応じて選定する。

X線透視は被検査物の影絵を見るため、X線管の焦点寸法(光源の大きさ)が小さいほどシャープな画像になる。X線装置はこの焦点寸法の大きさでマイクロフォーカスとミニフォーカスにクラス分けされている。一般的にミニフォーカスは数100ミクロン以上、マイクロフォーカスは数10ミクロン以下の焦点寸法である。鑄造部品や樹脂系部品の検査にはX線放射量が大きいミニフォーカス、電子部品やハイブリッド・プリント基板などには拡大透視が可能なマイクロフォーカスが用いられることが多い。

写真2にデジタル透視システムによる鑄物のキズ自動検出のデータ例を示す。鉄とアルミニウムの複合材で作られたギアとギアカバーである。上の画像は画像積分でX線量子ノイズを平



品名 : ギア  
透視条件 : 100kV, 0.4mA

品名 : ギアカバー  
透視条件 : 60kV, 0.4mA

写真2 デジタル透視システムによる鑄物のキズ自動検出

滑化した後、輪郭強調を行った入力画像、モノクローム画像では表現されにくい下はキズ候補を抽出して着色表示した画像である。150kVミニフォーカスX線装置と6インチX線によるシステムを使用した。画像処理は輝度ムラを除くシェーディング補正、及び局所的な閾値処理で2値化処理を行ってキズ候補を抽出した。最終的な良否判定は、キズ面積等の判定基準に沿って行う。

自動車はエンジンの制御や安全装置に加えて、電子情報システムの急速な発展により、デジタル化が進んだ。電子部品、半導体パッケージの小型化、高集積化、高性能化が進んでいるが、自動車の使用環境は他の用途より厳しく、厳冬期の低温から夏の高温度域まで安定して動作しなければならない。信頼性を確保するためには非破壊検査が欠かせない。マイクロフォーカスX線装置を用いると数1,000倍までの拡大透視が出来る。LSI (Large Scale Integrated Circuit)、チップ部品の検査、及びBGA (Ball Grid Array) やCSP (Chip Scale Package) による半導体パッケージとプリント基板間の接合検査は信頼性確保の上で極めて重要である。写真3はテーブルナビゲーション機能を示すものである。プリント基板の画像から任意の場所をクリックするだけで、狙ったデバイスへの位置合わせが可能である。高倍率の拡大透視をする場合に有効な機能である。写真4はハンダのクラックの例である。

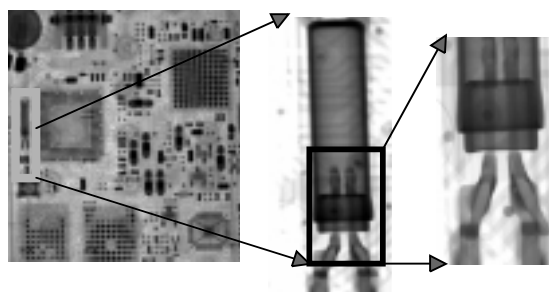


写真3 テーブルナビゲーション  
拡大位置を簡単に設定可能

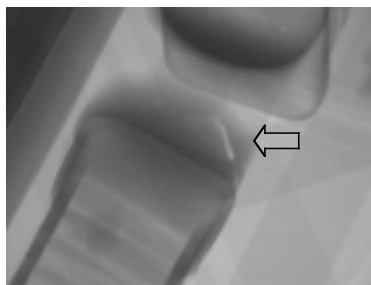


写真4 ハンダのクラック


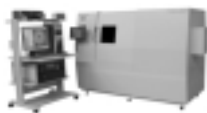
## CT

病院とCTの関係と同様、自動車産業にとってもCTは欠かせない存在になりつつある。第1表に示した開発・試作から事故解析に至るま

で、全ての工程でCTは使われている。

機構部品にはエンジン廻りのアルミニウム鋳物を主なスキャン対象とする400kVクラスのミニ・フォーカスX線を用いた産業用CTを適用する。シリンダブロックには鉄のスリーブが存在するため、分解能に加えてX線透過能力が重要である。電子系の対象にはマイクロフォーカスX線装置を用いた数100倍の拡大撮影が可能なマイクロCTを用いる。機構部品、電子系部品とも高集積化、高機能化が進んでおり、在来の2次元画像を得る他のX線検査手法では正確な情報が得られなくなってきている。機構部品の形状は複雑さを増すと同時に、キズの有無のみでは良否を判断できない場合がある。特に加

第2表 産業用CTとマイクロCTの特徴比較

項目	450kV産業用twinCT TOSCANER-24500 <sup>twin</sup>	225kV マイクロCT TOSCANER-22501 <sup>μhd</sup>
CTの特徴	 <p>450kVミニ・フォーカスX線を用い、分解能に加えてX線透過能力重視 シリンダブロック等の大型アルミニウム鋳物をスキャン可能 最大透過能力：アルミニウム300mm、 スチール110mm</p>	 <p>225kVマイクロフォーカスX線を用い、4<math>\mu</math>mの分解能を發揮 小型アルミニウム部品や電子部品系の対象物に適している コーンビームスキャンで1度に3次元画像表示可能な多数断面撮影が可能 最大透過能力：アルミニウム150mm</p>
寸法精度	$\pm 0.1 \sim 0.2$ mm	$\pm 0.01$ mm
スキャンエリア	300 / 400 / 500 / 600mmデジタル 4段階、h600mm	200mm以下任意、h300mm
スライス厚	0.5 / 1 / 2 / 3 / 4mmデジタル	2 $\mu$ m ~ 数mm任意
スキャンモード	シングル (1断面撮影) ツイン (2断面撮影) トリプル (3断面撮影)	ハーフ / フル / オフセット コーンビーム (最大1,024断面) オフセット・コーンビーム (最大1,024断面)
X線出力	430kV、400kV切り替え可能 X線焦点大小切り替え機能	225kV最大 X線焦点：最小4 $\mu$ m
検出器	検出器形式：固体・高分解能検出器	X線 + CCDカメラ
画像再構成	512、1,024、2,048画素 選択	256、512、1,024、2,048画素 選択 コーンビームスキャン可能
デジタルエンジニアリング	3次元形状情報抽出 (点群、STL) 計算機上の検査、リバースエンジニアリング	3次元形状情報抽出 (点群、STL) 計算機上の検査、リバースエンジニアリング
物体外形、質量	600 × H600mm、100kg	200 × H300mm、15kg

## (5)...X線透過法とCTによる内部検査

工面にキズが現れるかどうかを判断する場合は3次元的な画像表現が求められるため、CTが不可欠である。第2表に産業用CTとマイクロCTの特徴を比較した。

自動車産業では機構部品の設計を3次元CAD (Computer-Aided Design)で行っており、開発の段階から製造、品質管理まで3次元情報で行う機運にある。産業用CTは450kVミニ・フォーカスX線を用い、分解能とX線透過能力を重視したシステムで、シリンダブロックまでの大型アルミニウム鋳物をスキャンできる能力を持つ。最大透過能力はアルミニウムで300mm強、スチールで110mmである。これでほとんどのアルミニウム鋳物を撮影できる。寸法精度は $\pm 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ を発揮する。多数の連続断面を撮影することで3次元画像情報を得られるので、キズの形状や位置の3次元解析が可能である。

写真5に欠陥解析と寸法計測の例を示す。左はアルミニウム鋳物と空気のCT値 (X線吸収の程度を示す画素値) から閾値を決めて抽出したキズの体積に応じてカラーマップで表示してい

る (写真はモノクローム)。キズの位置、体積ごとの統計データをエクセルファイルで出力することができる。画像の下部に細長く表示されているのはキズ体積のカラースケールである。

右の画像は3次元データ上で、穴のシリンダ形状を抽出してその重心を求め、穴同士の寸法計測をしたものである。形状を認識することで寸法計測の精度を改善できる。

CTの原理は“ある囲まれた平面の画像はその平面内の全ての点を通る全ての方向の投影データ (線積分)があれば再構成できる”である。この条件を満たして短時間で、目的の画像性能を得るCTが望ましい。現在では性能、コストのバランスから工業用CTのスキャン方式はTR (Translate Rotate) とRR (Rotate Rotate) に集約されている。

450kVの高いエネルギーを持つ産業用CTはTR方式を採用している。産業用CTでは人体用と異なり、プラスチック、セラミックス、金属、及びそれ等の複合体など様々な材質、形状の物体を対象とし、高い画像化能力を要求される。TR方式はこの要求に応えられるものであ

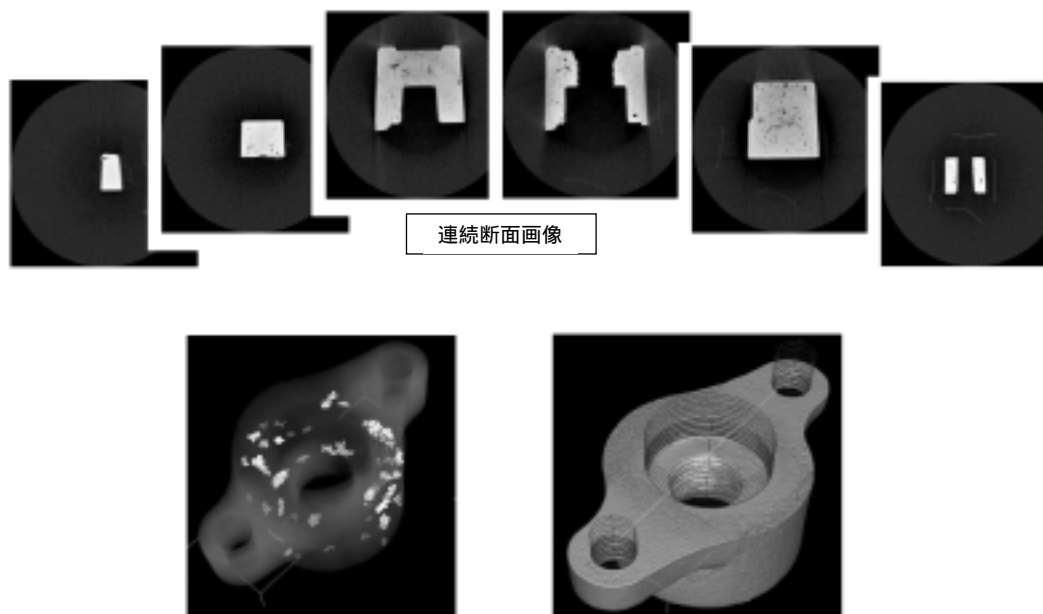


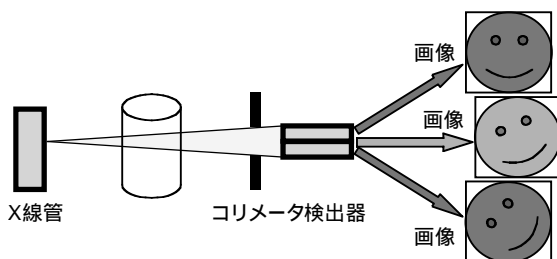
写真5 アルミニウム鋳物の欠陥解析と寸法計測

る。CTは検出器にファンビーム（薄くて広がりのあるビーム）を照射してデータ収集を行うが、TR方式は被写体の直線動作中にデータ収集を行う。直線運動の移動ピッチをトリガとしているので、自由なデータピッチで撮影が可能であり、スキャンエリア、空間分解能を柔軟に選択出来る。少ない検出素子数で高い分解能を得られる特徴を持ち、検出素子の間隔に寸法的な余裕があるため、散乱X線防止用素子間コリメータと検出素子同士のクロストークを防ぐセパレータを設けられる利点がある。これらは高エネルギーX線CTにとって極めて重要な要素であり、アーチファクト（偽像）が少なく、幾何歪のない、優れた画質を得るための基本技術である。

画質の点でTR方式はRRを大きく上回るが、唯一の課題は撮影に要する時間である。直線動作と回転を組み合わせたデータ収集を行うため、比較的長い撮影時間が必要になる。その課題を解決するのがtwinCTである。

第2図がtwinCTの概念図である。従来は1段の検出器だが、上下2段構成のtwin検出器を開発し、1回で2ないし3断面撮影できるようにした。高エネルギーX線に対する検出性能を保って多段構成にすることは極めて難しい技術であるが、素子構造と製作技術の開発により達成した。これにより、2倍ないし3倍の速さで撮影が可能になるため、TR方式CTの唯一の課題であった撮影時間の短縮を達成した。

写真6左がtwin検出器ユニットで、写真7はそれを横一列に並べて構成したtwin検出器であ



第2図 twinCT

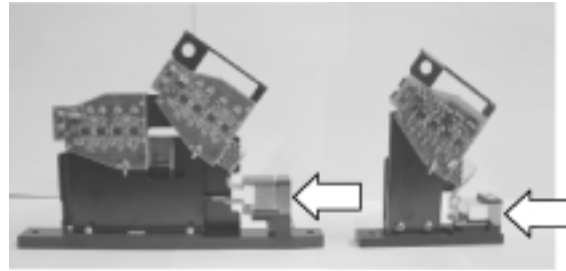


写真6 twin検出器ユニット、右：single

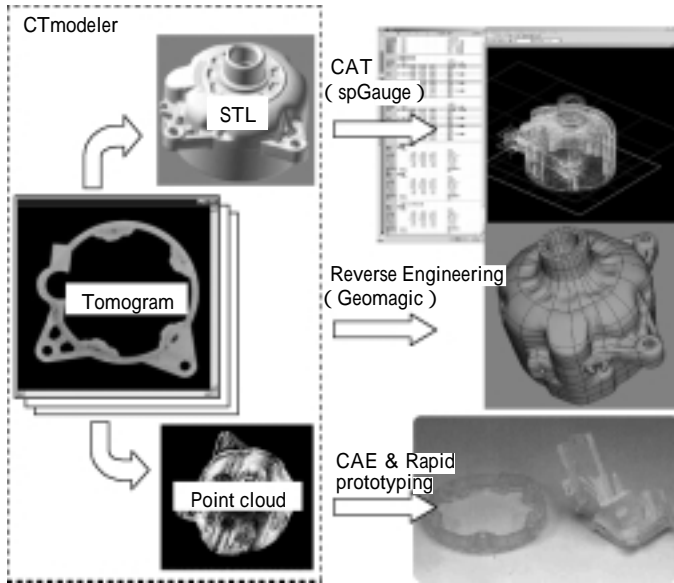


写真7 twin検出器の内部

る。CTの外観写真は第2表中に示した。

CTでは検査に加えてデジタルエンジニアリングが注目されている。従来、3次元形状計測には接触式や光学式の3次元測定器が使われてきたが、物体表面のみの情報では不十分であり、CTの内部構造を含めた高精度な3次元情報が必要である。CTは物体内外全てを測定可能な“X線3次元測定機”と呼べるものである。アーチファクトが少なく、幾何歪のない優れた画質を得られるTR方式CTの特徴がここで生きてくる。物体形状を正確に取り出すことが出来れば3次元CADの設計データと誤差検証が可能な“計算機上の検査”、“図面復元”、“構造解析や熱解析”、“既に存在する物体の複製（ラピッドプロトタイピング）”などができる。第3図にそれらの関連を示す。3次元形状抽出が可能なデジタルエンジニアリング用ソフトウェアCTmodelerで点群、STL(Standard Triangulation Language)を出力できる。連続した断面画像が

## (7)...X線透過法とCTによる内部検査



第3図 CTによるデジタルエンジニアリング

ら正確な物体輪郭を抽出することや、物体3次元形状の精度を保持してデータ量を合理的に削減する工夫をしており、2,000枚を超える断面画像の処理能力を持つ。

マイクロCTは前述のX線透視装置に高精度の回転テーブルと断面画像を作成する画像再構成システムを追加した構成である。エリアセンサを用いているので、1度に最大1,024断面を再構成するコーンビームスキャンが可能である。自動車産業の3次元画像情報化に適したCTであると言える。

225kVのCTはアルミニウム150mmを撮影できる能力があるため、小型アルミニウム部品を撮影できる。電子部品系は一般産業分野と同様にデバイス自体とその実装の信頼性を確認する。写真8に画像例を示すが、これら

電子部品系対象物は銅や鉛など重金属が多く含まれているため、アルミニウム鋳物部品と同様225kVのX線出力が必要である。

マイクロCTは数mmから200mm程度の物体を高い分解能でスキャンできるように、回転テーブルとセンサの位置を変えて拡大倍率を自由に設定できる“連続可変X線幾何系”を採用している。通常のCTでは固定している幾何系を切り替えると撮影前に校正、補正が必要になる。CTの一般的な校正に加えてX線の幾何歪補正、回転テーブルの回転中心位置を求めるセンタリング等の面倒な作業を行う必要が生じる。これを自動化するために、全自動校正法を開発した。

キャリブレーションが必要になる撮影条件の変更を行うと、システムは補正と校正の要求を画面に表示し、校正を実行できる。最も重要な校正はセンタリングであり、これを自動化するオートセンタリングソフトウェアを開発して組み込んだ。通常、治具を手動で設定する煩雑な作業を省略できるもので、自動的にX線投影データから回転中心を求めて画像再構成を行うので、校正を意識せずに使用できる。これらの自動校正、補正法の開発によりマイクロCTとしてシステムが完成された。

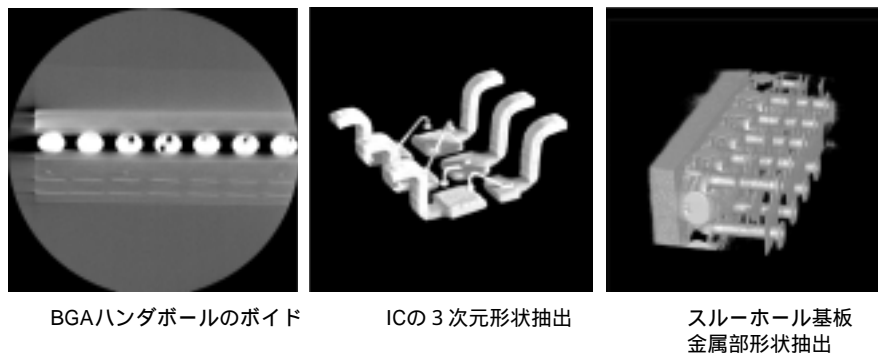


写真8 マイクロCTの画像例

## おわりに

技術進歩の速い自動車産業の検査要求に応えるX線応用技術のうち、X線透視法とX線CTについて述べた。X線透視法では量産される製品を能率良く検査すること、良否の自動判定を含む自動化システムが今後の流れであろう。また、開発から製造、品質管理まで急速に3次元情報化が進むなかで、CTの3次元情報に期待が高まっている。1回のスキャンで複数の断面を撮影可能な“twinCT”の開発と、マイクロCTのコーンビームスキャンは効率良く物体の3次元情報を提供できる。キズの形状や位置の3次元解析はもとより、物体の3次元形状を抽出して検査・解析を行うデジタルエンジニアリング分野での応用が今後加速されるものと考えられる。

### <参考文献>

M.Fujii, K.Uyama : “ Recent advances on X-ray CT, X-ray CT for Geomaterials-Soils, Concrete, Rocks-, A.A.Balkema Publishers, pp.1-12 (2004)

山岡亮介・他：“450kV X線を用いたtwinCTの開発”、非破壊検査協会2006年秋季大会講演概要集、pp.61-64 (2006)

藤井正司：“CTを用いたリバーエンジニアリング”、非破壊検査50、pp.698-730 (2001)

### 【筆者紹介】

藤井正司

東芝ITコントロールシステム

検査システム事業部 CAT

X線応用システム技術担当部長

〒183-0043 東京都府中市東芝町1

東芝府中事業所 22号館

TEL : 042-333-2574 FAX : 042-340-8085

E-mail : masashi.fujii@toshiba.co.jp

## 無害化技術を推進する専門誌

# 環境浄化技術

体  
裁

創刊年月日：2002年10月18日

発行日：毎月1日発行

発行部数：12,000部

判型・総頁：B5判、116頁

定価：1,600円

(本体1,524円)

年間購読料：18,000円

12冊(税・送料含)

## 本誌のねらいと特色

月刊「環境浄化技術」は、大気、水質、土壌・地下水、廃棄物・リサイクル等の無害化技術を推進いたします。

掲載内容は、環境管理実務にすぐ役立つ最新技術・利用技術と環境修復の基礎技術を、わかりやすく紹介、規格・法規の最新情報を掲載、地球環境の汚染を防止、資源・エネルギーの有効利用、廃棄物の削減リサイクルに役立つ内容といたします。

## 本誌をお読みいただきたい方々

官公庁、化学工業、産業機械、建設土木、繊維、鉄鋼、紙パルプ、食品、肥料、薬品、石油精製、化学、自動車、その他、環境管理技術者。地方公共団体、大学の図書館の方々に購読をおすすめいたします。

年間購読のお申し込みは

販売直通

☎ 03 3944 8001



**日本工業出版**

本社 〒113-8610 東京都文京区本駒込6-3-26 日本工業出版ビル

TEL.03(3944)1181(代) FAX.03(3944)6826

http://www.nikko-pb.co.jp/ e-mail:info@nikko-pb.co.jp

大阪営業所 〒541-0046 大阪市中央区平野町1-6-8-705  
TEL.06(6202)8218 FAX.06(6202)8287

日本橋事務所 〒103-0004 東京都中央区東日本橋3-5-7 ワタナベビル4階  
TEL.03(3808)1021 FAX.03(3808)1023

中国事務所 〒350001 福建省福州市鼓楼区湖东路宏利大厦  
東側公寓樓13階F座  
TEL.(FAX).0591-7855622