

みらくる型放射光による高精度非破壊検査

外径34cmの縮小に成功した可搬型放射光装置の開発

立命館大学 平井 暢・山田 廣成
 (株)光子発生技術研究所 長谷川大祐・森田 正樹

◆はじめに

近年、橋梁やプラント設備、建築物などの非破壊検査（メンテナンス、定期診断）の重要性が指摘されている。厚い構造物内部の可視化には、超音波法や、サーモグラフィーなど種々の方法があるが、放射線（X線）検査が最も信頼性のある検査方法として利用されている。放射線検査においては、利用するX線源によって空間分解能、透過能力、撮像時間が大きく異なる。工業用非破壊検査においては、微小光源からのX線出力の向上と高エネルギーX線による透過力の向上が良質なX線像を得るための必要条件とされているが、現在のところ、厚い被写体に対して必要なX線強度を発生するために、線源の焦点寸法は1.5mm～3.0mmが使われている。このため、コンクリート内部や、鋼材の溶接部などの微細なひび割れ、空洞等の欠陥まで検出することは困難である。500mm以上の厚みをもったコンクリートや50mm以上の厚みをもった鋼板に対してはメガエレクトロンボルト（MeV）までのX線を発生させることができる電子線加速器（LINAC）を用いた検査が行われるが、その焦点（光源）サイズも、ターゲットの熱的損傷の問題から0.5mm程度⁽¹⁾までが限界とされ、内部の微細構造を観察することはできない。しかし、プラント配管や鉄筋コンクリート

などの経年劣化を精度よく診断するためには、表面から見られない内部の微細なひび割れ、空隙の性状および鋼材の腐食状態等を知る必要があり、厚い構造体中の微細構造を識別できる高い透過能力と高い解像力をもった線源が要望されている。このような背景のもとで、我々は、立命館大学の山田により発明・開発された卓上型放射光装置“みらくる-6X”を用いて高度な非破壊検査を試みた。本装置は、10ミクロンという微小光源点を有する新しいX線発生機構に基づいた高エネルギー高輝度X線発生装置である^{(2)~(4)}。現在、(株)光子発生技術研究所⁽⁴⁾は、この基盤技術を基にして、さらに小型化・軽量化した可搬型高精度非破壊検査装置“みらくるCV”の開発を進めている。

本報では、みらくる-6X（立命館大学 放射光生命科学センター所有）を用いた拡大投影撮像法によるコンクリートならびに鋼材透過像の識別能評価試験結果および、現在開発中の4MeVタイプ可搬型装置“みらくるCV4”の開発状況について紹介する。

◆装置の概要および特徴

写真1に“みらくる-6X”の装置概観を示す。装置構成は、電子を発生し6MeVまで加速する入射器マイクロトロンと6MeVの電子を周回軌

道に蓄積する電子蓄積リングからなる。蓄積リングとマイクロトロン装置外径は、60cmに小型化され、装置全体の大きさは2m×1mである。“みらくる-6X”のX線発生原理は、蓄積リングの周回電子軌道上に微細な金属ターゲットを設置して制動X線を発生するというものである。第1図にX線発生機構の概略図を、写真2にX線ターゲットの概観写真を示す。“みらくる”では電子軌道上に張られた軽元素からなる細線の中心に微小な金属片を設置することによって微小点光源が実現される。X線の光源点サ

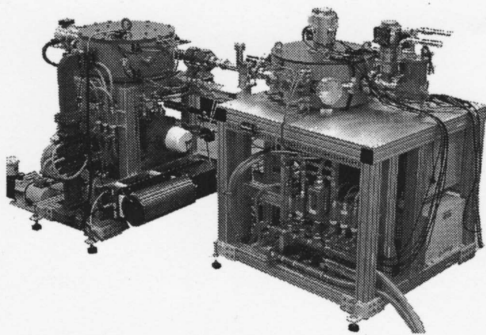
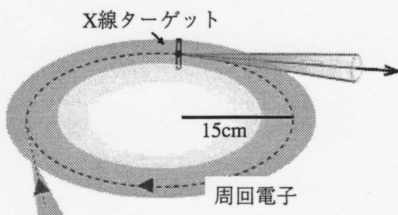


写真1 みらくる-6X概観写真



第1図 X線発生機構

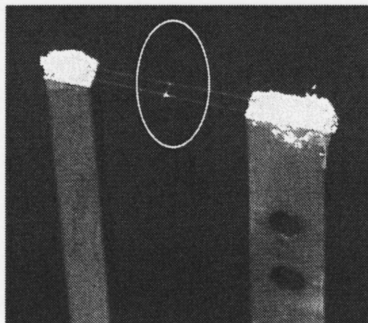
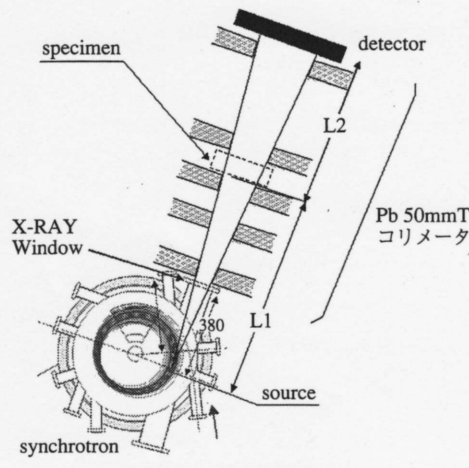


写真2 X線ターゲット

イズは、金属ターゲットの電子ビームとの衝突断面積と厚みで決定され、現在、10ミクロンの光源点を実現されている。みらくる型X線発生装置では、ターゲットにより大きな散乱や減速を受けなかった電子は再度周回してターゲットに衝突するため微細ターゲットでも強度を著しく低下することなく、高出力なX線を発生することができる。さらに、発生するX線のエネルギーは、最大エネルギーが電子エネルギーまで到達する。“みらくる-6X”の場合には、最大エネルギー6MeVまでの高エネルギーX線を発生する。“みらくる”のX線発生機構では、ミクロンオーダーの点光源からMeV領域まで含んだ高エネルギーX線源を発生できるため、“みらくる”は、厚い被写体に対して良質な透過像を得るために必要な条件を兼ね備えた新しいX線源であるといえる。

◆鋼材の識別能評価

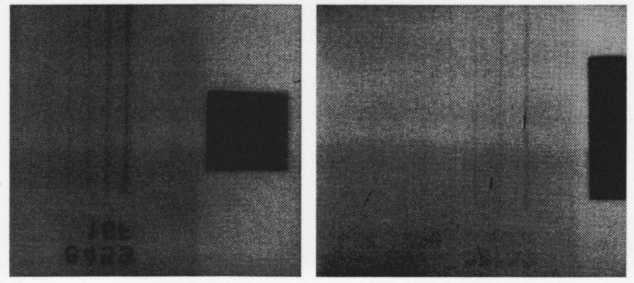
“みらくる-6X”を用い、鋼板の透過試験を行った結果を示す。鋼板については、JIS Z 3104 (鋼溶接継手の放射線試験方法)⁽⁵⁾に準じた評価および“みらくる”の特徴を活かした微小光源点およびデジタル検出器を利用した拡大撮像配置での評価を実施した。被写体には、諧調計および針型透過度計を線源側表面に設置した厚みの異なる平鋼板 (SM400B) を、検出器にはX線フィルム (FUJIFILM社製IX100) およびイメージングプレート (IP) (FUJIFILM社製ST-VI) を用いた。X線ターゲットには断面が $100\mu\text{m}\phi$ の白金 (Pt) ロッドを採用している。撮像配置図を第2図に示す。拡大撮像では、光源-被写体間距離 (L_1) = 0.8m、被写体-検出器間距離 (L_2) = 1.3mとし拡大率2.6倍で実施した。X線フィルム (IX100+増感紙) を使用した場合の撮像時間は、鋼板厚み9mm、25mm、50mmに対してそれぞれ、2min、8min、11minを要した。この際の電子の入射条件は、ピーク電流値100mAパルス幅



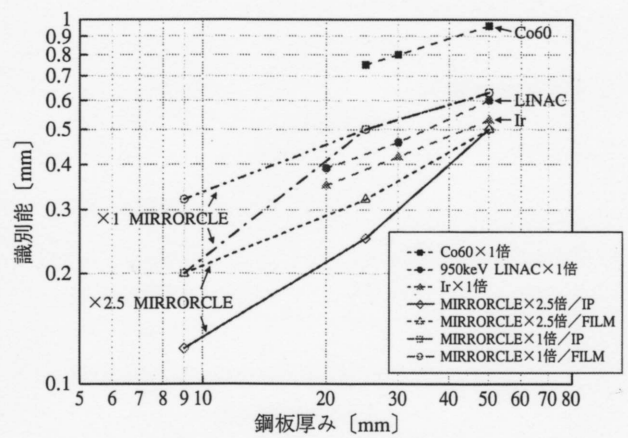
第2図 X線撮像配置図

0.1 μ sec、繰り返し数400Hzである。針金型透過度計の識別能は、IPを用いた場合は針金に対して垂直方向のライン強度プロファイルから、X線フィルムでは実験者以外5人の判定によって行った。写真3に透過写真例として50mm鋼板のX線透過写真（検出器はIP）を示し、第3図に各厚みに対する識別能の結果とJIS Z 3104解説⁽⁵⁾より参照した他の高エネルギーX線源（Ir、950keV LINACおよびCo60）の透過度計識別能を合わせて示した。JIS Z 3104に準じた等倍撮像配置でのX線像（写真3(a)）では0.63mm（右から5本目）、2.6倍X線拡大像（写真3(b)）では0.5mm（右から3本目）が識別できた。等倍撮像配置での識別能は1MVのライナックと同程度であった。等倍撮像においては幾何学的不鋭による識別能の低下はないことから、識別能の違いは高エネルギーX線により被写体から発生する前方散乱X線によるコントラストの低下に起因する。一方、散乱X線の影響が低下する拡大撮像配置では、識別できる最小線径は小さくなる。厚い被写体の透過像の像質レベルが、既存の高エネルギーX線源の等倍撮像結果に比較して良質の結果を示している。

高エネルギーX線を用いた非破壊検査において拡大投影撮像法は、高エネルギーX線によって生じる前方散乱X線の検出器への混入をエアギャップ効果により低減し、画質の劣化を防止する有効な撮像法である事が示された。既存のX線源を用いたX線撮像では⁽⁶⁾、厚い被写体に対して必要なX線強度を発生するために線源の焦点寸法がmmオーダーに設定されている。このため、拡大撮像配置では光源サイズに基づく幾何学的な不鋭によって解像特性が大きく低減し、拡大率（エアギャップ間隔）は大きく制限される。これに対して“みらくる”の微小ターゲットを用いた拡大撮像法は微小光源により高倍率の拡大撮像を可能とし、同時にエアギャップ効果によって散乱X線を低減することで厚い被写体の検査精度を向上できる有用な手法であることが示された。



(a) 等倍X線像 (b) 2.5倍拡大X線像
F16針型透過度計、20型諧調計 F08針型透過度計、20型諧調計
写真3 50mm厚平板鋼板のX線透視像

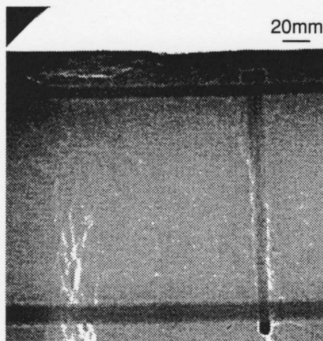


第3図 識別最小線径

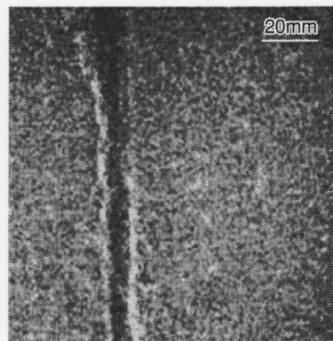
◆ コンクリート非破壊検査への応用

鋼板の透過試験により高エネルギーX線源を用いたX線透過検査においては、拡大撮像配置が散乱X線を低減させるのに有効であることが示されたが、コンクリートの場合、発生する散乱X線は鉄鋼に比較してさらに多くなることが知られている。このため、散乱X線により内部の割れ、ジャンカ等の識別能の低下が問題視されている。そこでコンクリートの透過検査に“みらくる”を用いた拡大撮像法を適用した。ひび割れ観察の被写体は曲げ破壊した $150 \times 240 \times 2,000\text{mm}$ の鉄筋コンクリート内部のひび割れに対して厚みが 150mm となる方向から実施した。X線検出器にはIPを用い、 $L1+L2=4.9\text{m}$ の位置に設置した。拡大撮像では、 $L1=1.7\text{m}$ （拡大率を3倍）とし、密着撮像より得られた画像との比較を行った。写真4に密着撮像および3倍拡大撮像時のX線透過像を示す。X線ターゲットには、断面が $25\mu\text{m}\phi$ 銅(Cu)ロッドを採用した。撮像に要した時間は、密着撮像で 100sec 、 $\phi 25\mu\text{m}$ ロッド型ターゲットを用いた拡大撮像で 500sec であった（電子の入射条件は、ピーク電流値 100mA パルス幅 $0.1\mu\text{sec}$ 、繰り返し数 400Hz ）。密着像を3倍に拡大した画像（写真4(b)）からは、鉄筋の周辺に生じている内部の割れがわずかに観測されるが、分岐した割れまで識別することはできていない。これに対し

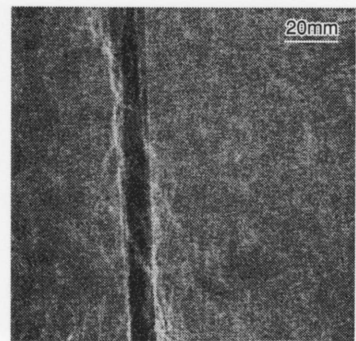
て、 $\phi 25\mu\text{m}\phi$ ロッド型ターゲットを用いた拡大撮像（写真4(c)）では、解像度が大きく向上し、コンクリート内部鉄筋周辺のひび割れの分岐が観察され、ひびわれの方向、幅まで識別することができた。これは、鋼板の透過試験同様に、拡大効果による透過像の空間分解能向上と散乱X線の検出器への混入が低減されたことに起因している。散乱X線による像質の劣化は、密着像におけるコンクリート中の $9\text{mm}\phi$ 鋼線のコントラストが拡大像に比較して $1/3$ になっていることから確認された。この際の散乱X線量の割合は、同じ位置に配置されたIP受光面で同一線量を得るために必要な照射時間の差より、検出器に到達するX線の80%に相当することがわかった。また、コンクリート透過後のX線像の空間分解能は、曲げ破壊されていない同厚みコンクリート上の鋼線識別度(RC像質計識別度)⁽⁶⁾により評価した結果、密着像で1%（ 1.5mm 鋼線を識別可能）の識別度を示したのに対して3倍拡大像では0.3%（ 0.6mm 鋼線を識別可能）の識別度を示した。これより微小ターゲットを用いた3倍拡大撮像によって 150mm 厚コンクリート中をサブミリ幅の空間分解能で識別可能であることが示され、コンクリート検査・診断において“みらくる”の微小ターゲットを用いた拡大撮像法が、良質なX線透過像を得るために有効な検査方法であることが示された。



(a) X線密着像（等倍）



(b) 写真(a)の鉄筋周辺の3倍拡大写真

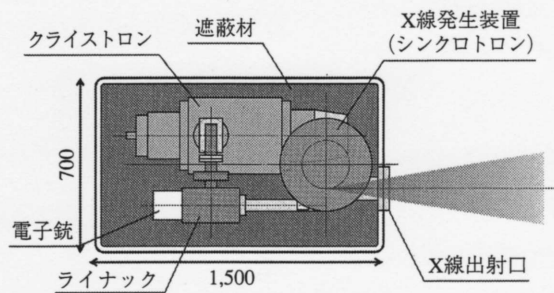


(c) X線3倍拡大透過像

写真4 コンクリートのX線透過像

◆可搬型非破壊検査装置の開発⁽⁴⁾

今回使用した“みらくる-6X”は、最大X線エネルギー6MeV、装置サイズ1m×2mであり、常設タイプの高出力X線源である。戸外へ持ち出して、既設コンクリート構造物やパイプラインの非破壊検査に用いることはできない。そこで、(株)光子発生技術研究所は、さらに小型、軽量化された“みらくるCV4”の開発を進めている。第4図に装置概観イメージ図を示す。本装置の電子軌道半径はわずか8cm、磁石外径は30cmである。永久磁石を用いることにより、電源や冷却水の供給が不要である。装置本体部は鉛ケースに収めて効果的に遮蔽をしている。入射器には4MeVの直線加速器(LINAC)を使用しているが、これは、2005年6月に、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律が一部改正され、4MeV以下の直線加速器を橋梁又は橋脚の非破壊検査を目的に一時使用することが可能となったためである。遮蔽を含めた装置本体部での重量を1トン以下に抑え、線源本体をロボットアームなどの先端に取り付け任意の箇所の非破壊検査を行う。みらくるCV4が発生するX線のエネルギー特性は、100keV付近にピークを持ち数10keV～4MeVにわたる。そして、みらくるCV4のX線強度は入射器の性能により“みらくる-6X”に比べ約10倍増大することが見込まれている。したがって撮像時間は、みらくる-6Xの1/10の時間で行え、拡大撮像配



第4図 開発中の可搬型高精度非破壊検査装置 (みらくるCV4) イメージ図

置においても短時間で検査が可能となる。さらに、X線視野は、みらくる-6Xの2倍強になり、光源-窓間距離は1/2になることにより広視野で高拡大率のX線撮像が可能となる。

“みらくるCV4”の運転は、PCにより自動化され、スイッチオンオフでX線の発生・停止が行える。また、スタンバイもすべて自動化されているおり、運転が複雑になる粒子加速器という印象は無く、専任のオペレータも不要である。また、みらくるCV4の運転に必要な電源容量は約40kVAであり、メンテナンスとしては、直線加速器の電子銃を年に一度交換する程度である。

“みらくるCV4”は、本年10月までに調整運転を終えて、実際に戸外へ持ち出して構造物の非破壊検査をおこなう計画である。“みらくるCV4”は、橋梁や橋脚、パイプラインといった構造物の非破壊検査だけでなく、車や航空機のエンジンの非破壊検査、空港のセキュリティチェックなどへの利用も視野に入れている。さらに、マイクロフォーカスX線管同様に、高倍率撮像によるX線顕微鏡やX線マイクロCTへの応用も可能である。

◆おわりに

“みらくる-6X”は実用的なX線強度と微小光源点をもった高エネルギーX線源として厚い鋼材やコンクリートなどの重構造物の精密検査に適した線源であることが示された。本装置を用いた拡大投影撮像法は、高精度な検査・診断を可能にすることが実証された。高エネルギーX線源を用いた非破壊検査では、被写体の厚みが増加するのに伴い前方散乱X線の割合が増大するため、同じ撮像配置では、厚い被写体ほど像質は劣化する。このため被写体サイズに応じた撮像配置(エアギャップ間隔)を設定する必要があるが、高倍率の撮像配置を設定した場合、2次元検出器のサイズによって照射野が大きく

制限されることを配慮しなければならない。さらに検査箇所周辺環境にも配慮しなければならない。厚み500mm以上の鉄筋コンクリートなど散乱X線が透過像に多く含まれる被写体に対して高い検査精度が要求される場合や、エアギャップ間隔がとれない状況などにおいては、照射野を限定するコリメータおよびラインセンサーを用い、散乱X線の発生と検出器への混入を可能な限り制限することが、光源サイズ効果を発現し検査精度を向上させる最も有効な手法であると思われる。そしてこのような撮像法においては、撮像時間を短縮するために、高い透過力、X線強度をもったX線源そして高エネルギーに高い感度をもつ検出器による検査システムの構築が要求される。“みらくる型X線発生装置”は、工業用非破壊検査において良質なX線透過像を得るためにX線源に要求される条件を満たす装置であるが、検出器との組み合わせによってさらに検査精度を向上できることが期待される。

<参考文献>

- (1) H.Miyai, K.Satou, H.Kitaguchi and S.Izumi: "A High Energy X-ray Computed tomography Using Silicon Semiconductor Detector", 1996 Nuclear Science Symposium Conference Record, Vol.2, pp.816-821 (1997)
- (2) 山田廣成: 応用物理、第74巻、第4号 (2005)
- (3) H.Yamada: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B199, pp.509-516 (2003)

- (4) <http://www.photon-production.co.jp/>
- (5) JIS Z 3104鋼材溶接継手の放射線試験方法
- (6) 日本非破壊検査協会規格NDIS1401-1992

【筆者紹介】

平井 暢

立命館大学 放射光生命科学センター
〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1
TEL: 077-561-2860 FAX: 077-561-2680
E-mail: thv21016@se.ritsumeai.ac.jp

山田廣成

立命館大学 放射光生命科学センター
〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1
TEL: 077-561-2860 FAX: 077-561-2680
E-mail: hy@se.ritsumeai.ac.jp

長谷川大祐

(株)光子発生技術研究所
〒525-8577 滋賀県草津市野路町字砂池2257-4
滋賀県立テクノファクトリー10号
TEL: 077-566-6362 FAX: 077-566-6368
E-mail: daisuke@photon-production.co.jp

森田正樹

(株)光子発生技術研究所
〒525-8577 滋賀県草津市野路町字砂池2257-4
滋賀県立テクノファクトリー10号
TEL: 077-566-6362 FAX: 077-566-6368
E-mail: morita@photon-production.co.jp

● 優良技術図書案内

● 流れわざのシルクロード【流量計測の歴史】

小川 胖著 A5判 240頁 定価: 2,520円 (本体2,400円)

● 視点を変えると見えてくる エンジニアの眼

広井和男著 B6判 216頁 定価: 1,260円 (本体1,200円)

お問合わせは日本工業出版(株)販売課まで 販売直通 03(3944)8001 FAX 03(3944)0389