

最新の非破壊検査に活用されるX線技術①

MIRRORCLE-CV4

超微小焦点高エネルギーX線源

株式会社光子発生技術研究所 山田 廣成・山田 貴典・長谷川大祐
林 太一・山田 真実

はじめに

X線非破壊検査のニーズが高まっている。様々な対象の超微細構造を非破壊で見たいという要求は最近のトレンドである。リバースエンジニアリングに用いたいという要求もよく耳にするところである。製品の高性能化や小型・軽量化に伴い検査技術の精度が要求されている。製品の安全基準や長寿命化の見直しや、資源の枯渇や高機能化の要求で新しい素材が出現することにより、非破壊検査技術の見直しが迫られている。

この様なトレンドに対して、X線発生装置に求められているのは、第1に、微小光源点の生成であるが、それはあくまでX線フラックスを損なうこと無しに微小光源点を実現することである。第2は、発生装置の小型軽量化である。小型軽量化は、現場での利用や製造ラインへ組み込むために必要である。しかし、この場合もフラックスを犠牲にしての小型軽量化は無い。そこで私たちは本稿で非破壊検査用にMIRRORCLE型卓上放射光装置の利用を紹介する。

従来、透過力が必要な厚い構造物の非破壊検査には1~10MeVライナック (LINAC) が用いられているが、その解像度は数mmである。我々が開発したマイクロトロンは、電子エネルギーの分散が小さいので、その解像度は0.5mmで

ある。これらに対して、卓上型放射光装置は、数MeVの高エネルギーX線発生装置でありながら、二桁以上精度の高い5 μ mという解像度を出すことができ、リバースエンジニアリングへの利用が進んでいる。MIRRORCLEは1~20MeVという低エネルギーの電子蓄積リングであり、放射光利用のために低エネルギーX線を発生することを第一の目的として開発され、実際XAFS、小角散乱、タンパク質構造解析等を目的としている。しかし、MeV領域の高エネルギーX線も発生している所から、非破壊検査の分野でも注目され、X線コンピュータトモグラフィ (X線CT) が精力的に行われている。本稿では、特に4MeVのMIRRORCLE-CV4を紹介する。

X線の発生方式

MIRRORCLEでX線を発生する方式は、磁場により電子に制動をかけてX線を発生する通常の放射光とは異なり、電子の周回軌道中に微小ターゲットを挿入して、電子をターゲット原子に衝突させて電子に制動をかける方式である。エネルギーを損失しなかった電子は、周回して何度もターゲットに衝突する。X線の発生原理そのものは制動放射でありLINACやマイクロトロンでX線を発生するのも同じ原理である。

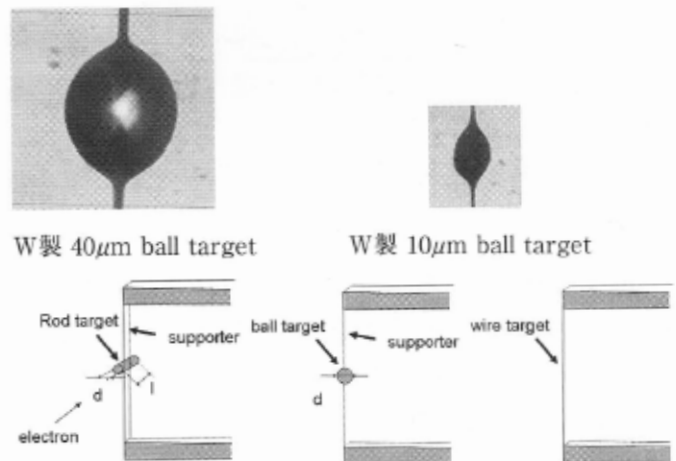
X線は相対論的電子そのものから発生し、原子を励起して発生するわけではない。放射光で磁場を用いる場合もMIRRORCLEでターゲットを用いる場合も、いずれの方式も電子に制動をかける点で制動放射と呼ぶ物であり放射の性質は類似している。即ち、放射のスペクトルが連続でありかつ放射角が電子エネルギーに反比例して狭くなるのが特長である。但し、制動放射では電子エネルギーまでのX線を発生できるのに対して、放射光では1テスラの磁場を用い、電子エネルギーが8GeVでせいぜい1MeVまでのX線を発生する。

LINACやマイクロトロンを用いる場合、電子エネルギーを最大限X線に転換するには分厚いターゲットを使用しなければならない。電子はターゲットを1回しか通過しないから転換効率を上げるために分厚いターゲットが必要である。従って必然的にターゲットの中で電子は多重散乱を起こし放射角が広がる。低エネルギーのX線はターゲットにより吸収されて熱になるためにターゲットの冷却が必須である。一方、MIRRORCLEの場合、ターゲットが微小であるために、入射電子は透過し、発生する2次電子も透過するために発熱量はmW以下のオーダーであり、ターゲットの冷却は不要である。

山田がMIRRORCLE型放射光を提案したのは20年前のことである。2つのタイプを相次いで提案している。最初の提案は1991年で、逆Compton散乱を利用するタイプである⁽¹⁾。続いて提案したのは制動放射や遷移放射を利用するタイプで⁽²⁾⁽³⁾、1994年のことである。いずれも小型・低エネルギー電子蓄積リングをベースとするので放射光装置という言葉を使っている。しかし、放射の特性は大型放射光とは非常に異なっている。

MIRRORCLEの場合は電子蓄積リングを使用するから、微小ターゲットに衝突しなかった電子や、衝突しても透過した電子を繰り返し衝突させることが出来るから、ターゲットが微小

であってもX線への転換効率は落ちない。低エネルギーX線がターゲットに吸収されることが無いので、低エネルギーX線を発生できる。微小ターゲットなので多重散乱が起きにくくX線は前方へ集中する。光源点のサイズはターゲットの断面積で決まるから、加速器の収束力には無関係である。現在実用化されているターゲットの大きさは、直径10 μm のボール状である。実効的な光源点のサイズは、5 μm になる。微小ターゲットは、カーボンナノチューブで出来たワイヤーで吊すことにより、支持材からの放射は極力発生しないようにしている。第1図が実際に製作したターゲットであるが、顕微鏡下でつくるターゲットはステートオブアートと言って良い。ターゲット製作のための特別な治具も開発している。



第1図

コの字型フレームにカーボンナノチューブでできた糸を張り、これにボールターゲットを接着する。ターゲットの材料は、W、Cu、Mo、Au等で、目的によりサイズと材質を決める。ワイヤーターゲットを用いて横方向解像度2.5 μm を出すこともできる。

電子蓄積リング

MIRRORCLE-CV4とCV1はそれぞれ全エネルギーで4MeVと1.5MeVの装置である。装置は量産を目指したもので軽量化と可搬性を追求して電子蓄積リングを永久磁石で構成している。最終的にMIC入射器も永久磁石で構成する

が、1号機としては、リングの入射に必要なエネルギーを微調出来るように電磁石にした。第2図は4MeV装置である。装置全体をクレーンでつり下げられるほどに小型化と軽量化を達成した。実際に、我々は、CV4とCV1を移動して使用した実績を持つ。



第2図 卓上型放射光装置MIRRORCLE-CV4

電子蓄積リングは、CV1及びCV4で軌道半径が8cmであり、ヨークを同じ形状、大きさにして共用できるようにして磁極の構造だけを変えて蓄積エネルギーに対応している。入射のためのパータベータの形状も、CV1とCV4で同じである。運転はトップアップで行い、繰り返しは、CV4で5kHz、CV1で10kHzを実証している。入射可能なタイミング幅は200nsというのがシミュレーションの結果であり、実際に200nsより長くなると入射されない。アクセプタンスは非常に大きく、約50mm・mrad有るのに対してマイクロトロンのエミッタンスは30mm・mradであるからほぼ100%のビームが入射される。ピーク電流値はCV1 (CV4) では400 (300) mAであるから、1パルスの入射で46 (35) Aが蓄積される。これは平均値である。電荷としては0.045 (0.06) μ C、電子数としては5.1 (3.8) \times

10^{11} 個であるが、軌道半径が短く、周回繰り返し数が大きいため大電流の蓄積となる。この電子がすべてターゲットに衝突してX線に転換されるとき、分光強度Brillianceで 10^{14} /[s,mrad², mm², 0.1%bw]を得るのには、10kHz運転が必要となるため、その様なパータベータ電源の開発も行っている。

電子軌道に微小ターゲットを挿入してX線を発生するので、ターゲットが10ミクロン ϕ ならば、電子ビームがターゲットに衝突する確率は $\pi \times 0.005^2 / (200 \times 3) = 1.3 \times 10^{-7}$ だという議論があるが、それは誤りである。電子ビームはベータトロン振動をしながら位相が進むので、最終的に全ての電子が必ずターゲットに衝突する。特に我々のシンクロトロンは入射中のベータトロン振動数が1/2整数になるので、ノードが1つあり、このノードの位置が100周回程度で一周するので必ず中心軌道上に有るターゲットに衝突する。一度ターゲットに衝突するとフェーズがピン止めされて、ターゲットを中心に1/2ベータトロン振動を行う。従って、その後電子は必ずターゲットに衝突する。電子エネルギーが10%程度変わっても電子ビームが周回し続けるのもMIRRORCLEの特長である。非常に大きなダイナミックアパチャーを持っている。それが完全円形弱収束型リングの特長である。このことは、実験により証明されている。

さて、低エネルギーMIRRORCLE型放射光を開発して明らかになった事は、低エネルギーMIRRORCLEの方がX線強度が高い事である。当初、高エネルギー電子ビームを使えば、X線の放射角が $1/\gamma$ に従って狭くなるから有利であると考えていたが、不必要な高エネルギーX線発生のために電子エネルギーが使われることは必ずしも有利では無かったのである。その結果、我々は、X線発生装置としてのMIRRORCLEには1~4MeV蓄積リングを用い、6MeV以上の高エネルギーMIRRORCLEは、遠赤外線発生及びEUVの発生用として位置付けている。

MIRRORCLEのX線強度

幾つかの方法でX線の線量測定を行っている。DOSEモニタ（イオンチェンバー）、SDD、Si-PIN、イメージングプレート（IP）、フラットパネル（FP）等である。分光器やADCを用いて限られたエネルギー領域の分光強度測定も実施している。制動放射の場合、X線エネルギーは数keVからMeV領域にわたるため、高エネルギーX線による散乱が影響して絶対測定は困難であるが、非破壊検査用線源としては、DOSEモニタを用いて、吸収線量であるGy（ジュール/kg）で表すのが適当であり、他の線源と比較するのが容易である。

全X線量を求めるのにイオンチェンバーを用いて測定した。低、中エネルギー用のイオンチェンバー（PTW N23342及びTN31013）を用い、さらにTN31013にビルドアップキャップを付けて高エネルギー領域を測定したのが第1表である。低エネルギー用は8～30keV領域、中エネルギー用は150keV以下、ビルドアップ付き高エネルギー用は1MeV以上のX線に対して感度が高いがそれ以外に対して全く感度が無いと言わけでは無い。検出器の断面は、2×3mm²。測定はすべて光源点から1mの位置で行ってい

る。単位はmGyである。

第1表に示した様にMIRRORCLEの測定結果は各モデルの電子エネルギーの違いを反映している。CV1では1MeV以上の高エネルギーX線が発生していない事を示し、低エネルギー成分が顕著である。CV4では高エネルギーの線量が中・低エネルギーをしのぐ。6XではCV4よりさらに高エネルギー成分が増える。中エネルギー成分について、6XとCV4を平均電流値当たりで比較すると、CV4の強度が25倍強いことがわかる。

興味深いのは、MIC1とCV1の比較である。電子エネルギーが同じであり、発生電子数もそれぞれ同じであるが、CV1のX線強度は、MIC1より16倍高い。これは明らかに電子ビームを周回させた事による違いである。即ち、ターゲットが有る状態で、ターゲットを透過した電子が平均15周していることがわかる。この値は、理論計算とほぼ一致している。

以上の結果は、新しいX線発生機構をよく説明している。ライナックなどで電子ビームをターゲットに衝突させてX線が発生する場合には、ターゲットが厚い方が線量が高いのは明らかである。しかしMIRRORCLEの結果は異なっている。ターゲットの断面積が小さく、ある

第1表

model	Dose rate [mGy/min @1mdistance]			Xray target type	beam current, repetition, timing window, total charge
	Model #23342 soft xray (8 - 30 keV)	Model #31013 hard xray (< 150 keV)	Model #31013 hard xray (~1.3 MeV)		
MC1		1380		1mm thick Pb	300mA, 1kHz, 2μs, 600μC
CV1	16800	21600	18	Cu 30μm foil	300mA, 10kHz, 200ns, 600μC
CV4	172	490	544	W 30μm ball	200mA, 5kHz, 200ns, 200μC,
6X	-	10	24	W 30μm ball	120mA, 400Hz, 200ns, 10μC
20SX	-	-	11	Be 100μm thick sheet	120mA, 500Hz, 200ns, 12μC

MIC1、MIRRORCLE-CV1、-CV4、6X、20SXのX線強度を校正されたイオンチェンバー（IC）を用いて計測した。3種類のICは計測する中心X線エネルギーが異なる。CV1は100keV以下のX線利用に優れ、CV4は100keV以上のX線利用に適している。同じ1MeV電子エネルギーであるが、CV1のX線発生効率がMIC1よりも格段に優れている。MIC1では低エネルギーX線の発生が難しい。

程度薄い方がX線強度が高くなる。X線フラックスは、ターゲットの断面積や厚さには依存しない。しかし輝度は断面積に反比例して大きくなる。この計測で求めているのは、光子密度であるから、ターゲット断面積が小さいほど高輝度が得られるという理論を良く実証している。空間積分を行えばターゲットの形状にはあまり依存しない。

以後、我々は、CV4は非破壊検査用として位置付け、CV1は100keV以下の放射光利用に適している。制動放射は一般的には高エネルギーガンマー線発生用として使われるが、MIRRORCLEでは低エネルギーX線の発生効率が高いので、放射光利用に使うことができる。

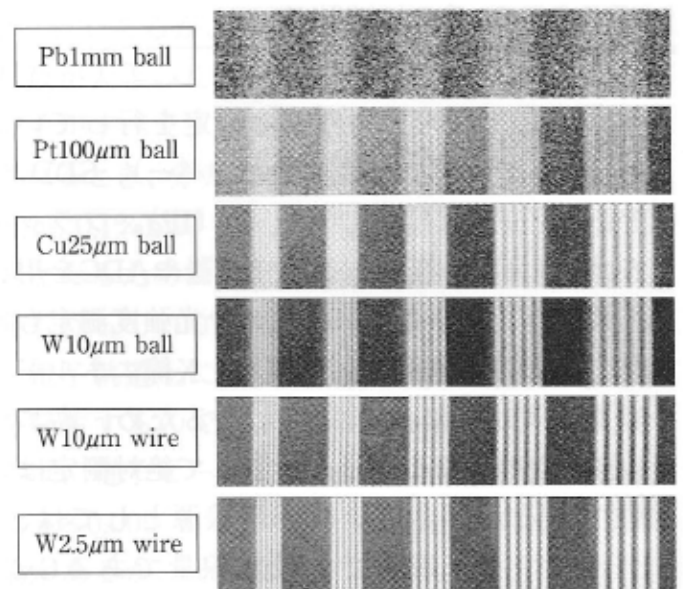
MIRRORCLE-CV4を用いた非破壊検査

(1) 単純撮影

MIRRORCLEを用いたイメージングについては様々な基礎データを蓄積している。

従来の非破壊検査と異なる点は、数10keVからMeV領域の連続高エネルギーX線発生装置として、最高5 μm の解像度を出せることが特長である。ターゲットは例えばタングステンの粉体から一個のボールを取り出して、カーボンナノチューブを寄り合わせて作った糸を支持材にして接着剤で固定している。連続使用して1週間ほどの寿命が有る。検出器にはイメージングプレート (IP) を使用する。ピクセルの大きさは、150 μm である。微小光源点であるために、拡大撮像を行うことができ、10倍拡大ならば、15 μm の解像度となる。

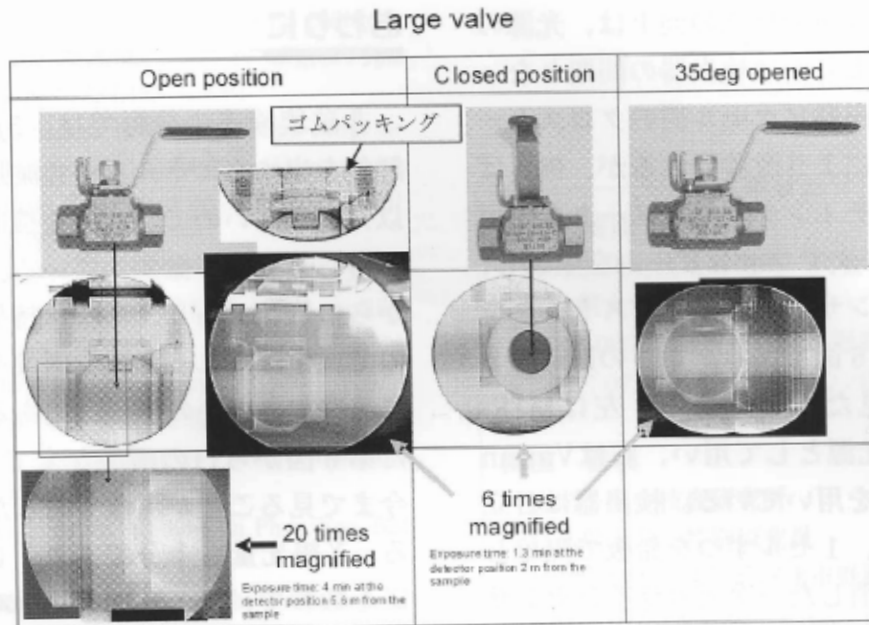
第3図に示すのは、解像度である。X線チャートを用い、ターゲットの大きさを変えて撮像している。拡大率は12倍である。微小光源で空間分解能が上がるのはもちろんであるが、S/N比が上がることも見逃せない。これは、被写体から検出器までの距離が遠くなるために、散乱X線の影響が少なくなるためである。二次元検



第3図 X線チャートを用いた解像度の評価
最小ピッチは、20L/Sであるから、25 μm 以下を見ることは出来ない。ターゲットの大きさを1mmから2.5 μm まで変えて測定した。2.5 μm を実現するのは、ワイヤーでしかできない。従って、ワイヤーに垂直の方向の解像度は、2.5 μm 以下となるが、水平な方向は、ぼける。ターゲットの大きさにより明らかに解像度が異なるが、S/N比が上がることも注目されたい。

出器の分解能は、150 μm であるが、20倍拡大撮像により、7 μm の解像度を出すことができる。用いたX線チャートは、最小が20ラインアンドスペース (ls) であり、25 μm までを識別できるが、それ以下については、ラインエッジのプロファイルから解像度を求めている。現在のところ最小ボールターゲットは10 μm であるがワイヤーターゲットで、2.5 μm を出している。イメージングには、コーンビームを用いているが、断層撮影でファンビームを用いるときには、2.5 μm の解像度を出すことができる。

次に具体的なイメージングの例を示す。第4図は、石油の精製装置に使われるバルブである。開閉した時の内部の状態を6~20倍拡大で撮像している。バルブは長さ15cmほどの鉄製である。ねじ山が鮮明に見えているところから分かるように解像度は0.1mm以下である。内部にあるボール状の弁が開閉する様子を見ているが、画像処理を行うとゴムのパッキングを識別できる。鉄製のバルブ内部のゴムパッキングが見えるメカニズムは必ずしも明確ではないが、微小



第4図 鉄製バルブを開閉した様子を、MIRRORCLE-CV4を用いて拡大X線イメージングで見た様子(鉄の内部に有るゴム製パッキングが識別できている)

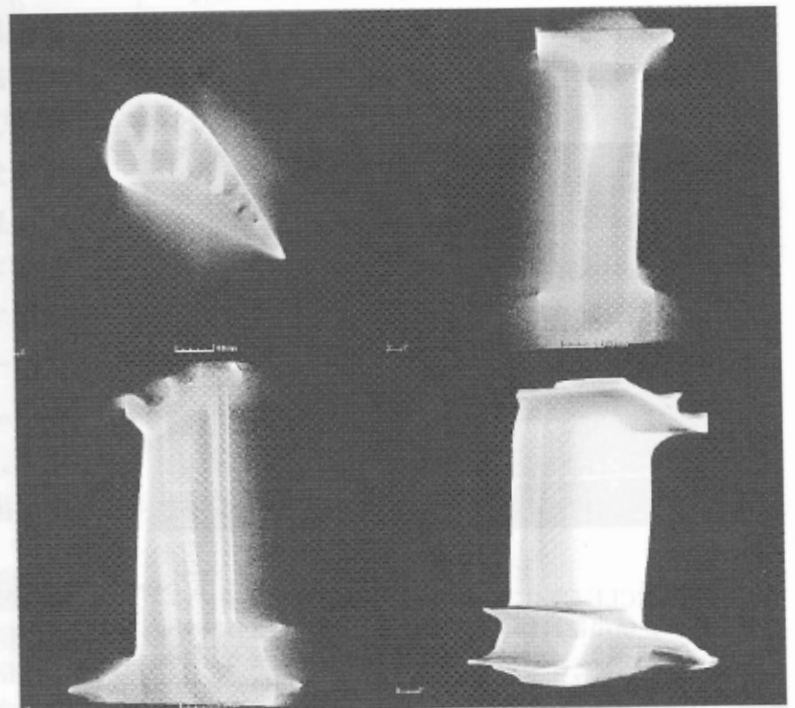
光源であり、極めて指向性の高い放射で有ることが理由であるのは疑いの余地がない。銅板に発生したミクロンオーダーの亀裂、配管内の錆の状態なども明瞭に見えている¹³⁾。

(2) MIRRORCLE-CV4を用いたX線CT

医療診断に用いるX線CTと工業製品の非破壊検査に用いるX線CTには違いがある。前者では、1mm程度の解像度が有れば良いとされるが、後者ではミクロンオーダーが要求される。リバースエンジニアリングでCADデータと照合する作業が行われる。現在、盛んにMIRRORCLE-CV4を用いたCTが行われるのは、解像度が優れているからである。5 μ mの解像度を出すMIRRORCLE-CV4を用いて、360点のデータ取得を一点30秒程度で行っている。入射の繰り返し数を500Hzで行った場合のことであるが、現在これを5kHzにする改造する作業が進んでいる。即ち一点3秒で計測することが可能となる。30

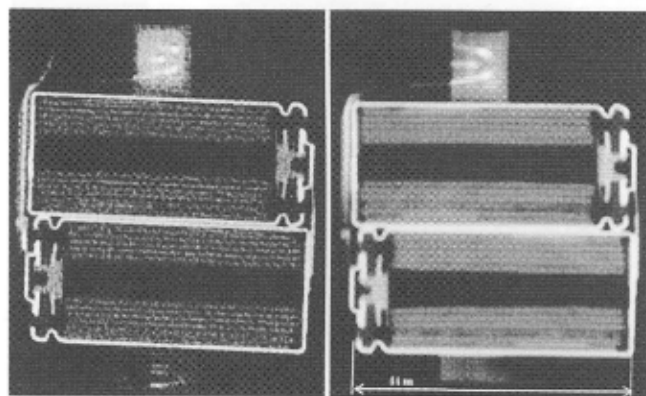
秒で計測したタービンブレードの三次元断層写真を第5図に示す。

タービンブレードは、多数の水管が内部に走っているが、これを見ることは、従来のいずれの装置でも困難で有った。解像度は十分に出ていて、内部の細管が見えるのだが、散乱線の除



第5図 タービンブレードのCT撮像結果

去が課題である。今後の性能の向上は、光源の問題であるというよりは検出器の問題となっている。二次元検出器ピクセル間のクロストークを抑制することにより改善されるが、例えばフィルタ、グレーティング、コリメータを使用して行う。コリメータでファンビームを生成し、一次元のラインセンサを用いてクロストークを減少させた例が第6図である。単2のLi電池2個を横に並べて見たものである。左はMIRRORCLE-CV4を光源として用い、右はVarianの6MeV Linatronを用いている。検出器は日立製作所が開発した、1セルずつを鉛板で隔離してクロストークを消した一次元のラインセンサである。ラインセンサのセルの幅は1mmであった。2つ並べたLi電池に横からX線ファンビームを照射し、360度回転して1度毎に撮影してCTを実施した。散乱光の影響はどちらの画像にも見当たらないが、解像度の差が歴然としている。MIRRORCLEでは、光源-試料-検出器の間隔が1:1であり、2倍拡大の配置であるから、0.5mmの解像度を実現している。実験は、MIRRORCLE-CV4を日立製作所に移動設置してラインセンサと結合して行われた。一日で移動設置を完了できるまでコンパクト化が進んでいる。



第6図

左：MIRRORCLE-CV4にコリメータを使用してファンビームを生成し、検出器にはラインセンサを用いてクロストークを消したCT撮影。試料はLi電池である。一断層だけを撮影して表示している。右：光源にLinatronを用いた断層写真（日立製作所との共同研究で撮影）。解像度の差が歴然としている。

おわりに

非破壊検査の分野では、 $5\mu\text{m}$ という空間分解能を出す高エネルギーX線源はMIRRORCLE以外には無いので、様々な機関から様々な試料が持ち込まれて撮像している。その殆どが企業からの依頼であり、秘密保持契約を結んでいるので、すばらしく鮮明な画像や断層写真をここに公開できないのは残念であるが、ここに示した第6図から11の画像が全てを物語っている。今まで見るのが困難であったものが見えている。X線光量も十分であり、CTでは1点の測定を数秒で、360点を10分でスキャンできる性能を備えている。

卓上型放射光は、1MeV装置を戸外に持ち出して橋梁の非破壊検査を行った実績を持つ。シンクロトロンを戸外に持ち出した世界で初めての例であろう。シンクロトロンはデリケートな装置であるが、一体で形成される電子蓄積リングと、やはり一体で形成されるマイクロトロン入射器で構成されるMIRRORCLEであるからこの様な離れ業が可能となった。3日に渡って測定を行い、一日は雨という天気であったが、運転に支障が無かった。これは、或る企業からの委託でシンクロトロンを戸外に持ち出したのだが、橋梁検査は1MeVのマイクロトロン単体で十分に目的を達成できることを述べておきたい。MIRRORCLEの利用は戸外に持ち出すことが本来の目的ではない。 $5\mu\text{m}$ という高い解像度で自動車エンジンやEVモータ等の精密なリバースエンジニアリングを行うことが目的である。従来見えなかった物がMIRRORCLEで見え、更に精細なCTを実施できる装置を世の中に出すことができた。

<参考文献>

- (1) H.Yamada, H.Tsutsui, D.Amano, S.Masui, Y.oba, K.Mima, and K.shimoda, "Compact hard X-ray source based on the photon storage ring", Rev. Sci. Instrum 63 (1), pp.741-744 (1992)

- (2) H.Yamada, "Super photon generator using collisions of circulating relativistic electrons and wire targets". Jpn. J. Appl. Phys., Vol.35, pp.L182-L185 (1996)
- (3) H.Yamada, "The smallest Electron Storage Ring for High Intensity Far-Infrared and Hard X-ray Generation", (Journal of Synchrotron Radiation) pp.1326-1331 (1998) (Invited paper for SRI97)
山田廣成: "高輝度遠赤外線及びハードX線発生のための世界最小電子蓄積リングの開発", 放射光, 11(2), pp.155-165 (1998)
- (4) Koch and J. W. Motz, Rev. Mod. Phys. 31, 920 (1959)
- (5) H.Yamada, "Novel X-ray source based on a tabletop synchrotron and its unique feature", Nucl. Instrum. Methods B 199, pp.509-516 (2003)
- (6) T.Takayama, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B24 /25, 420 (1987)
- (7) H.Yamada, "Stimulated emissions in the exact circular electron storage ring", AIP Conf. Proc. 367, pp.165-180 (1995)
- (8) See the video on the radiation damping in MORRORCLE-20SX by visiting the WEB of PPL :
http://www.photon-production.co.jp/en/whatsmirrorcle_e/detail_e.htm
- (9) Toru, Hirai, et. al., "Refraction contrast 11x-magnified X-ray imaging of large objects by MIRRORCLE-type table-top Synchrotron", Journal of synchrotron radiation, Vol.13, pp.397-402 (2006)
- (10) Ryuichiro Tanaka, T. Hanashima, H. Yamada, "New Polar Constituents in the Pupae of the Silkworm bombyx mori L.(II) : Developmental Changes of the Constituents", Biosci. Biotechnol. Biochem, 74(10), pp.2133-2136 (2010)
- (11) 平井暢・山田廣成・長谷川大祐・森田正樹: "みらくる型放射光による高精度非破壊検査 (Extremely accurate non-destructive testing using MIRRORCLE)", 検査技術 (Inspection technology), 133, pp.9-14 (2007)
- (12) Please visit the WEB site of PPL :
<http://www.photon-production.co.jp/j/application/non-destructive.htm>

【筆者紹介】

山田 廣成

株式会社光子発生技術研究所 代表取締役
立命館大学 教授
〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46
TEL : 077-566-6362 FAX : 077-566-6368

山田 貴典

株式会社光子発生技術研究所
立命館大学 特別研究員
〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46
TEL : 077-566-6362 FAX : 077-566-6368

長谷川 大祐

株式会社光子発生技術研究所
立命館大学 特別研究員
〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46
TEL : 077-566-6362 FAX : 077-566-6368

林 太一

株式会社光子発生技術研究所
立命館大学 特別研究員
〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46
TEL : 077-566-6362 FAX : 077-566-6368

山田 真実

株式会社光子発生技術研究所
立命館大学 特別研究員
〒525-0058 滋賀県草津市野路東7-3-46
TEL : 077-566-6362 FAX : 077-566-6368

— 優良技術図書案内 —

● 最新の水素技術シリーズ

B5判 144頁 定価: 3,000円 (本体: 2,857円)

お問い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