

論文 レーザー逆コンプトン γ 線を用いたコンクリート内部の鉄筋の検出

金田 尚志^{*1}・豊川 弘之^{*2}

要旨:コンクリート内部の調査手法として、レーザー逆コンプトン γ 線の適用を検証してきた。その結果、コンクリート内部の配筋、空隙、0.2mm 幅以上のひび割れを鮮明にとらえることができた¹⁾。これまでの実験では、装置の都合上100mm四方のコンクリートブロックを用いて行ってきたが、実構造物への応用の可否を確認するため、供試体サイズを大きくしてコンクリート内部の鉄筋を検出する実験を行った。また、擁壁やトンネルの覆工など背面に検出器を設置できない場合を想定し、表面側から電子陽電子消滅線を検出することで、鋼材位置の推定を行った。レーザー逆コンプトン γ 線を用い、電子陽電子消滅線によるCT画像の撮影は、世界的にみても過去に事例が無く、新しい試みである。
キーワード:非破壊検査, レーザー逆コンプトン γ 線, CT画像, 電子陽電子消滅線

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋を検出する非破壊検査手法として、一般的に電磁波レーダ法や電磁誘導法が用いられている。これらの手法は簡易にコンクリート表面近傍の配筋状態を把握することができ、操作性も良いことから、広く普及している。しかし、鉄筋が深い位置にある場合や多段配筋、ピッチが狭いなど、配筋が複雑な場合は精度良く検出することが困難である。かぶり厚さ、鉄筋径も推定可能であるが、誤差が生じることがある。

放射線を利用した透過画像の撮影も配筋状態の把握に威力を発揮する。X線フィルムまたはイメージングプレートを測定対象の背面に設置し、工業用ポータブルX線発生装置からX線を照射し、埋設物や空洞の位置を検出する。X線発生装置から照射されるX線は、円錐状の放射光のため、透過画像は、幾何学的に拡大された投影像となり、深さ方向の位置はわからないという問題がある。現在運用されている工業用ポータブルX線発生装置では、厚さ350mm程度のコンクリートが実用上の適用限界である。

産業用X線CT装置によるコンクリートの断層画像の撮影も試みられている²⁾。CADと連動した3次元計測システムも開発され、3次元デジタルスキャニングも可能となってきている。

著者らは、より鮮明に、高い密度分解能でコンクリート内部を調査する手法としてレーザー逆コンプトン γ 線を利用した実験を行ってきた。その結果、レーザー逆コンプトン γ 線の有効性を確認し、コンクリート中の鋼材、粗骨材の配置、空隙、幅0.2mm以上のひび割れを鮮明にとらえることができた。これまでの実験では、測定装置の都合上、100mm四方の小さなコンクリートブロック供試体を用いてきたが、大型ステージを導入し、供試体寸法を大きくしてより実用に近い設定で実験を行った。

CT画像ならびに透過画像の撮影では、検出器を測定対

象の背面に設置する必要がある。柱や梁部材では可能であるが、擁壁やトンネルの覆工などには適用できない。そこで、物質に γ 線を照射した際に生成される電子陽電子消滅線をコンクリート表面側(レーザー逆コンプトン γ 線入射側)から検出することで鉄筋の位置を推定できるか検証した。

2. レーザー逆コンプトン γ 線のコンクリート調査への導入

2.1 レーザー逆コンプトン γ 線の利点

リニアック(電子線直線型加速器)による制動放射X線を用いたCTシステムが産業製品の検査等に用いられている。しかし、厚い物体の検査に適用するためには線源の強度を非常に高くするか、エネルギーを高くする必要がある。この方法で10MeV以上のX線を発生しようとするとき中性子の発生を伴い、中性子による検出器のダメージや人体への被曝などの問題も発生するため、エネルギーを高くすることは容易ではない。また制動放射線であるため、吸収硬化によるアーチファクトが問題となる。レーザー逆コンプトン γ 線は従来の制動放射X線と比較し、以下のような利点がある。

透過力の高い準単色線源

吸収硬化によるカップリング効果が見られない

指向性・密度分解能が高い

大きな構造物の高分解能非破壊検査を行うための理想的な線源としては、高エネルギーで中性子の発生がなく、また高い指向性を持ち、かつ単色性が良いことが重要である。更にエネルギー可変性があれば、元素の識別等、より高度な観測が可能となる。したがって、レーザー逆コンプトン γ 線は、コンクリート内の透過画像を撮影するのに最適な線源といえる。

2.2 レーザー逆コンプトン γ 線の発生

レーザー逆コンプトン γ 線はレーザーと電子の衝突(コンプトン散乱)により発生する³⁾。図-1のように加速させた電子にレーザーを照射すると、照射と逆方向に高エネルギー γ 線が

*1 (株)日鐵テクノリサーチ 検査・計測事業部 八幡センター 博士(工学) (正会員)

*2 (独)産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 光・量子イメージング技術研究グループ 主任研究員 博士(工学)

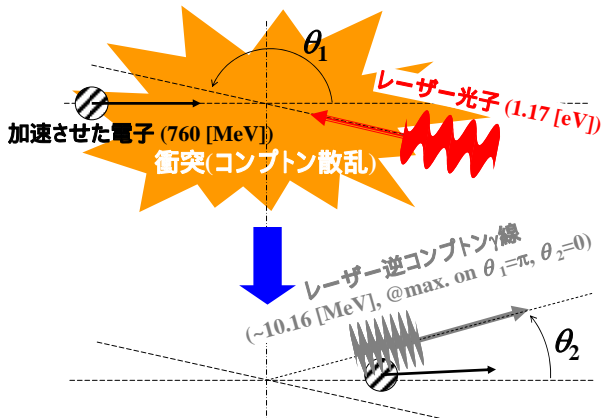


図-1 レーザー逆コンプトン γ 線の発生原理

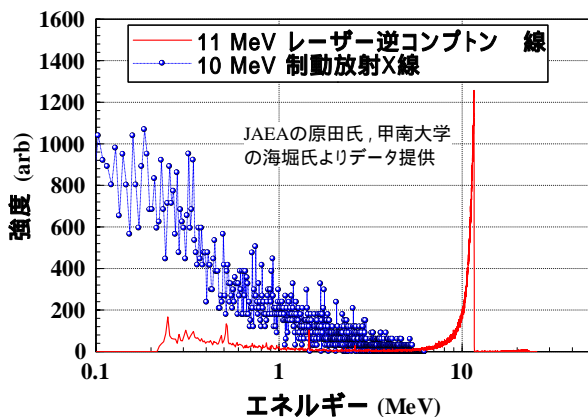


図-2 レーザー逆コンプトン γ 線のエネルギースペクトル

発生する。図-2 はレーザー逆コンプトン γ 線と通常の制動放射 X 線のエネルギースペクトルを示したものである。制動放射 X 線と比較し、エネルギーが高いことが確認できる。

2.3 レーザー逆コンプトン γ 線 CT システム

(独)産業技術総合研究所では図-3 に示す CT システムを

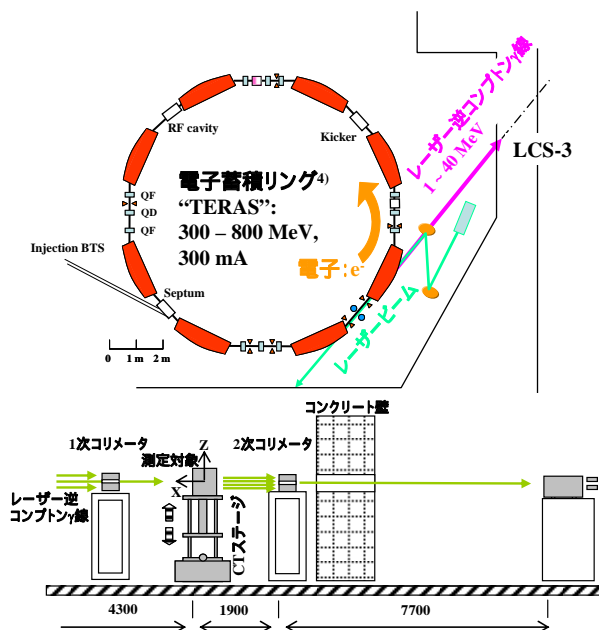


図-3 レーザー逆コンプトン γ 線 CT システム

開発し、運用している。リニアックで発生させた電子を電子蓄積リング“TERAS⁴⁾”に入射・蓄積する。蓄積完了後、ビームラインシャッターを開閉し、加速させた電子にレーザービームを照射すると、レーザーの逆方向に γ 線が発生する。コリメータでビーム径を絞り CT ステージ上の測定対象を透過したビームを γ 線検出器で検出する。本実験で用いているのは第一世代(Translate/Rotate)と呼ばれる CT システムであり、供試体をステージ上で、上下左右に移動、さらに回転させることにより、複数方向からレーザー逆コンプトン γ 線を照射するのと同じ測定条件をつくりだしている。コンピュータで処理(画像の再構成)を行った後、透過画像を得る。

3. 既往の研究成果^{1), 5)}

3.1 コンクリートブロック内の鉄筋の検出

コンクリート内の配筋状態と鉄筋径の検出を検証するために、図-4 のように異なる径の異形鉄筋を配置した供試体を作製した。

供試体下面から 20mm の位置の CT 画像を図-5 に示す(スキャン時間 2.0mm/秒)。鉄筋の配筋状況、ならびに鉄筋径を正確に検出できていることが確認できる。また、異形鉄筋のリブの形状もとらえており、コンクリート中の気泡(エントラプトエア)の位置も確認することができる。

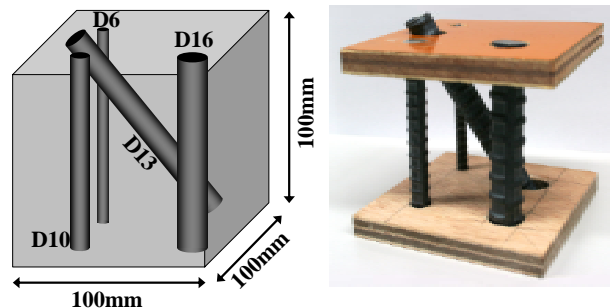


図-4 鉄筋検出用供試体

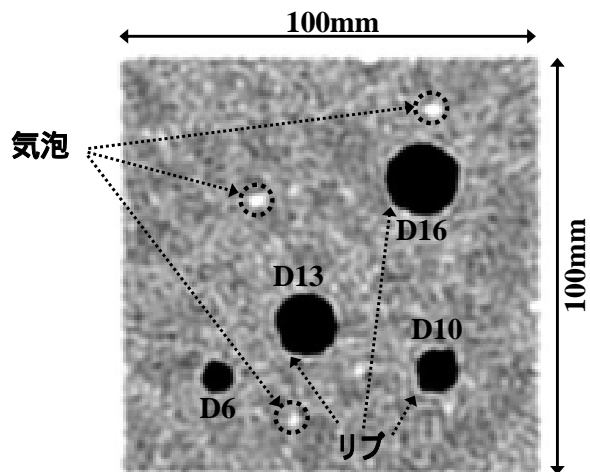


図-5 コンクリートブロック内の鉄筋の検出

3.2 コンクリートブロック内のひび割れの検出

コンクリート内部のひび割れ性状の検出を検証するために、図-6 のようにひび割れを有する供試体を作製した。引張鉄筋を配筋した 100×100×400mm の供試体を予め作製し、π型ゲージで下面のひび割れ幅を計測しながら、最大ひび割れ幅が 1.5mm となるように曲げ载荷を行った。その後、供試体サイズが 100mm となるようにコンクリートカッターで切断した。

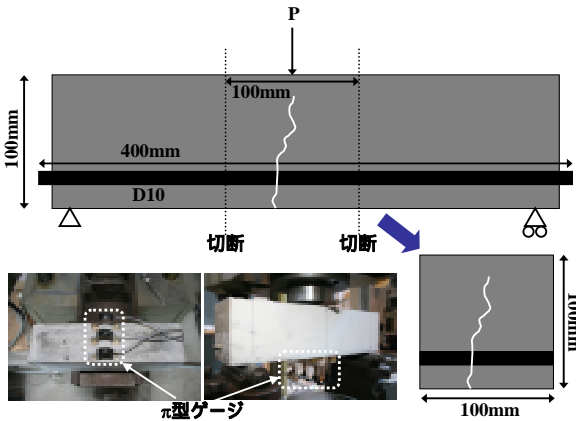


図-6 ひび割れ検出用供試体

実際のひび割れとコンクリート内のひび割れの整合性を確認するため、梁側面部を上面とし、コンクリートブロック供試体上面から 5mm における面のスキャンを行った(図-7: スキャン時間 1.6mm/秒)。

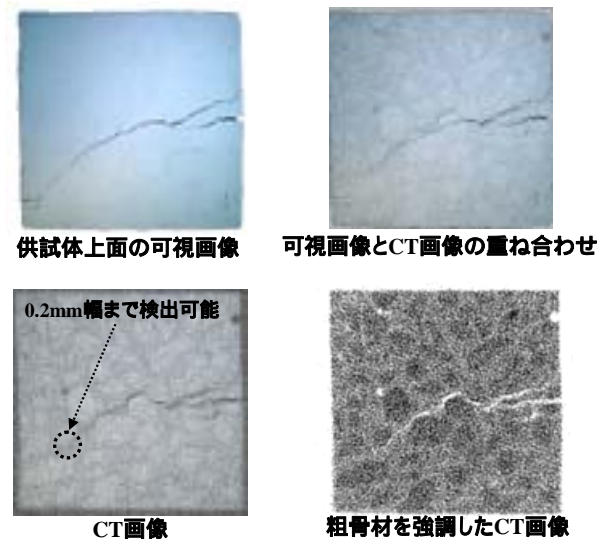


図-7 ひび割れを有するコンクリートブロックの CT 画像

CT で撮影したひび割れパターンと実際のひび割れパターンが一致していることが確認できる。粗骨材の分布状況も把握でき、ひび割れは、粗骨材界面に沿って進展していることが観察できる。クラックスケールで測定を行ったところ、0.2mm 幅までのひび割れが検出された。

4. 330mm 厚供試体の透過画像の撮影

4.1 供試体概要

図-5, 7 の実験結果からわかるように、レーザー逆コンプトンγ線 CT システムを用いることにより、コンクリート中の配筋状態ならびにひび割れ性状を明確に検出できることが確認された。100mm 厚程度のコンクリートに対する透過力は十分であることは明らかだが、実際の構造物へ適用する場合には、更に厚い供試体での検証が必要である。そこで、図-8 に示すように異なる深さに鉄筋を配置した供試体を作製した。奥行方向に 50mm 間隔で D10 軸方向筋を、更に D10 横方向の鉄筋を配置している。

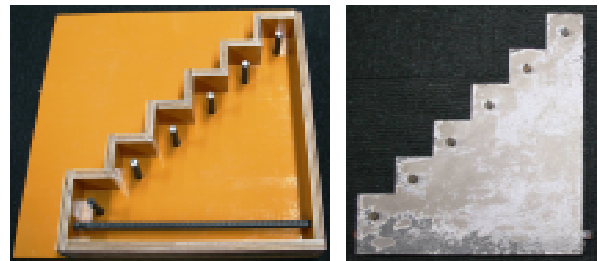
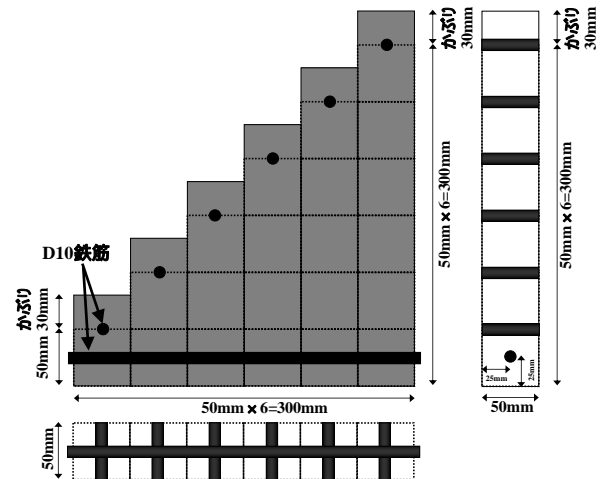


図-8 供試体概要

4.2 透過画像の撮影

供試体をステージに載せ図-9 の矢印の方向で透過画像を撮影した(点線の左側と右側で別々に撮影している)。

コンクリート厚が 330mm と厚い場合でも、鉄筋像が得られている⁵⁾。一般に用いられている X 線発生装置でこの厚さのコンクリートの透過画像を撮影する場合、コントラストをつけるためには 10 分以上の照射時間が必要であるが、今回の実験条件では、スキャン時間が 2mm/秒と 1mm² あたり 0.5 秒の照射時間でこのようなコントラストを得ることができ、高い透過力が確認できる。

4.3 CT 画像の撮影

図-10 は CT 画像である。スキャン時間を 10.0mm/秒と設定したため、図-5, 7 と比較して解像度は低いが、軸方向筋ならびに横方向筋の配筋状況を確認することができる。また、粗骨材の分布もとらえている。

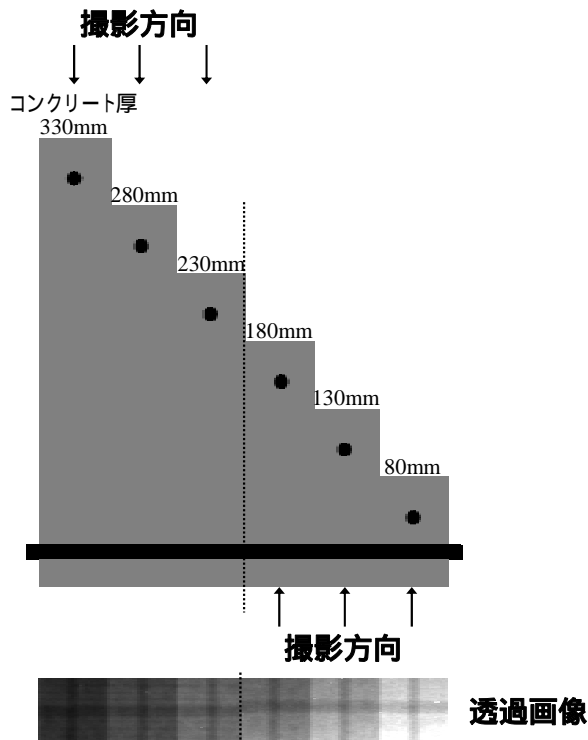


図-9 透過画像の撮影結果

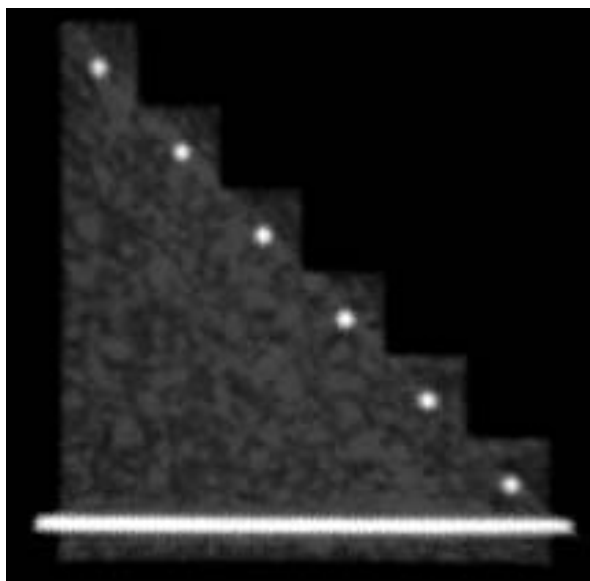


図-10 供試体の CT 画像撮影結果

5. 電子陽電子消滅線による鉄筋位置の推定

5.1 電子陽電子消滅線の発生

γ 線のエネルギーが高い場合、図-11 のように電子や原子核の近くを通った際に、 γ 線が消滅するかわりに1組の電子と陽電子を生成することがある(電子対生成)。生成された陽電子が電子と対消滅すると 511keV の γ 線が 180 度対向方向に1 対放出される(電子陽電子消滅線)。

5.2 電子陽電子消滅線の検出

物質に γ 線を照射した場合、密度が高い物質は単位体積中により多くの原子核があるため、密度が低い物質より電子陽電子対を生成する確率が高くなる。また、生成した陽電

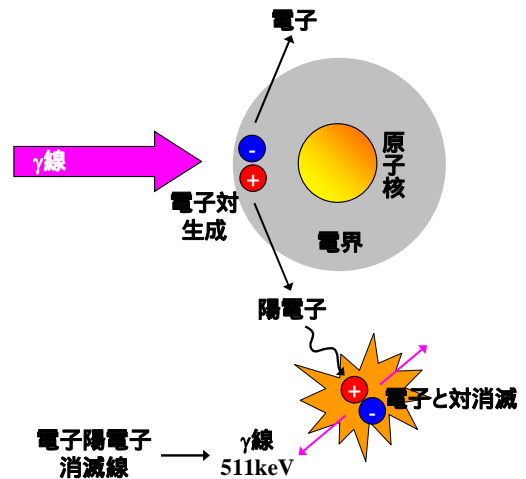


図-11 電子陽電子消滅線の発生機構

子が電子と再結合(対消滅)する確率は物質の電子密度に比例する。したがって電子陽電子消滅 γ 線の生成確率はおおむね物質の原子番号の2 乗に比例し、鉄筋からはコンクリートより1桁程度高い強度の 511 keV の消滅 γ 線が発生する。そのため、鉄筋コンクリートにレーザー逆コンプトン γ 線を照射すると、 γ 線軸と鉄筋が重なった際に 511keV の γ 線のカウントが増加する。図-12 のように供試体の前面に高純度ゲルマニウム(HPGe) γ 線検出器を設置して電子陽電子消滅線を検出する。

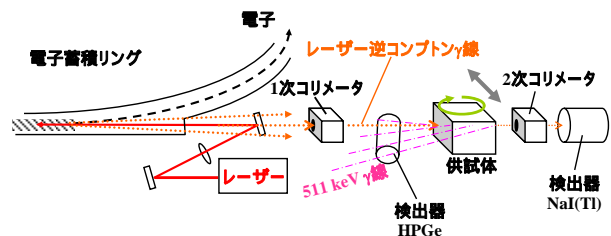


図-12 電子陽電子消滅線の検出方法

図-13 は供試体前面に設置した HPGe 検出器が検出した γ 線のエネルギースペクトルの一例である(測定開始から 305.67 秒の総カウント数)。511keV のカウント数が高くなっていることが確認できる。放射性的 ^{40}K はカリウム全体の 0.0117% を占めており、カリウムが存在すれば必ず検出され、周囲の物質およびコンクリートに起因するものである。

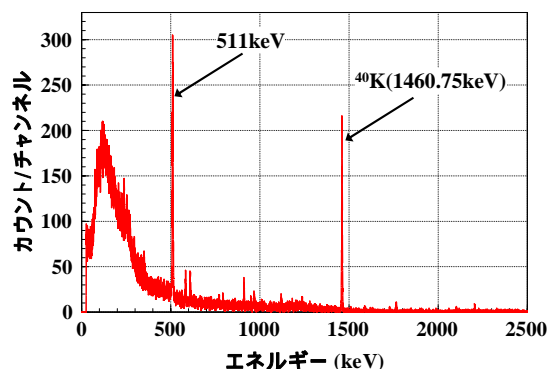


図-13 HPGe 検出器のスペクトル

5.3 電子陽電子消滅線を用いた CT 画像の撮影

HPGe 検出器で電子陽電子消滅線を検出し、同時に NaI(Tl)シンチレーション検出器で供試体を透過した γ 線を検出する(図-14)。

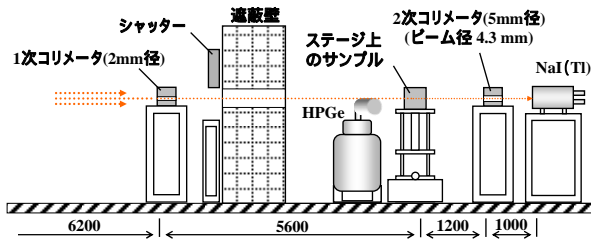
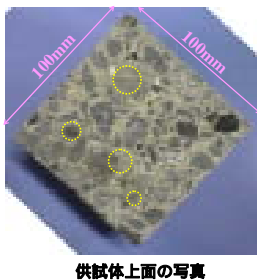
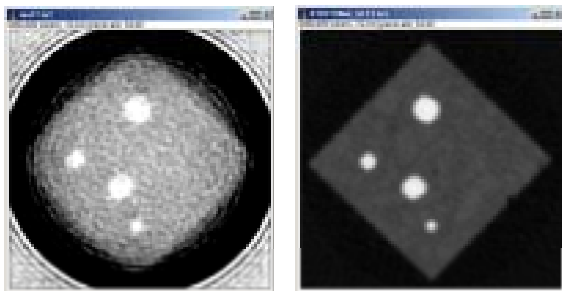


図-14 CT システムの模式図

図-4 に示す供試体を用いて供試体上面から 20mm の位置の CT 画像を撮影した(図-15: スキャン時間 2.0mm/秒)。CT の画像再構成は、フィルタ逆投影法(前処理フィルタ: Shepp-Logan フィルタ, butterworth フィルタ)で行った。電子陽電子消滅線を用いた CT 画像は、511keV の γ 線のカウン数が小さかったため、不鮮明ではあるが、鉄筋とコンクリートの判別は十分に可能である。511keV の γ 線は、 4π 方向全体に放射されるが、現在のシステムではその一部しか検出できていない。システムの改良により精度を向上させることができると考えられる。



供試体上面の写真



電子陽電子消滅線を利用したCT画像 (511keV) レーザー逆コンプトン γ 線を利用したCT画像 (9.05MeV)

図-15 電子陽電子消滅線を用いた CT 画像

実際の測定時には、レーザー逆コンプトン γ 線のビームライン上に立ち入らないことで被曝を避けることはできる。511keV の γ 線は、 4π 方向全体に放射されるが、図-13 からわかるように、本実験で用いている程度の線源では、自然放射線より少し高いレベルの極めて微弱な信号なため、放射線被曝の懸念は一切無い。

6. まとめ

既往の実験結果から、レーザー逆コンプトン γ 線の有効性を確認していたが、今回は新たに大型ステージを導入し、供試体サイズを大きくしてCT画像の撮影を行った。その結果、330mm 厚(CT撮影時の供試体斜め部は 450mm)のコンクリート供試体への適用が十分に可能であった。今後は、更に部材厚の厚い供試体を用いて実験を行い、レーザー逆コンプトン γ 線の透過力を検証する予定である。

調査対象物の背面に検出器が設置不可能な状況を想定し、前面からの検査の可否を検証した。供試体から放射される電子陽電子消滅線を前面から検出することで、鉄筋の位置を検出できることが確認された。今回の実験では、供試体を回転させているため、深さ方向の情報(配筋状況)が得られている。しかし、実用においては、調査対象面からの放射のみの情報しか得られない場合が多い。今後は、図-16 のように 511keV の γ 線の信号の変化から金属部や未充填部の検出に取り組む予定である。この場合、鉄筋のかぶり厚いと γ 線が減衰して 511keV の γ 線が検出器まで届かないことが考えられる。限界検出深さについても検証したい。

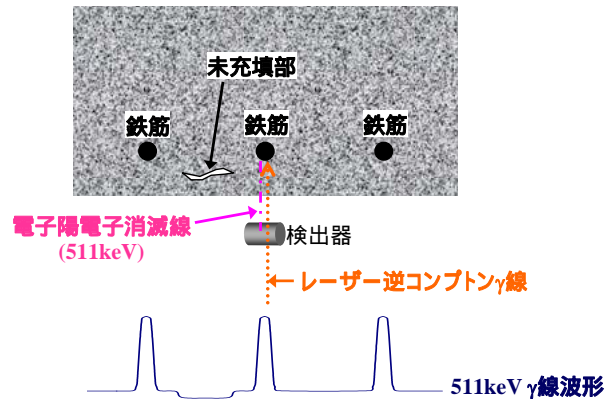


図-16 前面一方向からの鋼材の検出

参考文献

- 1) 金田尚志, 豊川弘之, 魚本健人: レーザー逆コンプトン γ 線によるコンクリート内部の検査, 最新技術を使うところまで見える コンクリート工学, Vol.45, No.6, pp.35-40, 2007.6
- 2) 日立製作所ホームページ: http://www.pi.hitachi.co.jp/rd-jpn/field/industrialsys/accelerate/ctdevice/2007992_16140.html
- 3) R. H. Milburn: Phys. Rev. Lett. 10(3), pp.75-77, 1963
- 4) H. Ohgaki, H. Toyokawa, K. Kudo, N. Takeda, and T. Yamazaki: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A455, pp.54-59, 2000
- 5) 金田尚志, 豊川弘之, 魚本健人: レーザー逆コンプトン γ 線によるコンクリートの透過画像の撮影: 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 5-031, pp.61-62, 2007

