

### 3D Visualization of Fast Light Emission Phenomena by Dynamic CT

Mikiko AIDA, Takahiro KOZAWA, Tohru UEDA, Toshiaki KOBAYASHI,  
Mitsuru UESAKA, and Kenzo MIYA

University of Tokyo Nuclear Engineering Research Laboratory  
2-22, shirakata-shirone, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, Japan

Abstract

3D visualization of Cherenkov radiation in water generated by an electron beam from the 28 MeV linac of University of Tokyo was performed. We introduce the light emission computed tomography theory. We adopt the fan beam projection using a rotating mirror, a collimator, an optical fiber and a photo-multiplier. Cherenkov radiation passing through the collimator enter a photo-multiplier via an optical fiber. The optical fiber should be shielded against X rays. At the first stage, a transverse distribution of Cherenkov radiation was reconstructed.

### ダイナミック光放出 CT による高速発光現象の 3次元動画像化

1. はじめに

CT(Computed Tomography)は診断技術、治療技術の分野において近年著しく進歩している。ダイナミック光放出 CT とは、CT のアルゴリズムを適用して発光体の 3次元動画像化をはかるものであり、ここまで蛍光灯や放電管のミリ秒オーダーの発光が得られている。本研究の目的はその時間分解能をさらに向上させ、ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒の発光現象の動画像化を得ることである。今回は、そのための基礎実験として、東大ライナックを使って水中のチェレンコフ放射を対象に実験を行ない、光放出 CT の計算により発光分布画像を再構成した。

2. CT の原理

物体の CT 画像を得るには、まずその物体の投影データをつくる。光放出 CT の場合、物体のある断面の発光分布を  $f(x,y)$  とすると、 $\theta$  方向の投影データ  $p(r, \theta)$  は図 1 に示すような  $x$ - $y$  座標系から角度  $\theta$  回転した  $r$ - $s$  座標系を用いて

$$p(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(r \cos \theta - s \sin \theta, r \sin \theta + s \cos \theta) ds$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - r) dx dy$$

と表される。この式を Radon 変換という。

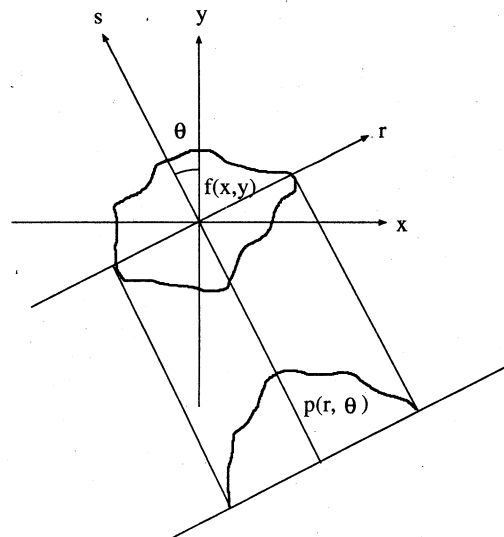


図 1 : 物体の投影

ここで  $r = x \cos \theta + y \sin \theta$ 、 $s = -x \sin \theta +$

$y \cos \theta$  である。この変換を  $0 \leq \theta < 2\pi$  の範囲の  $\theta$  に対して行い、投影データが得られる。次に投影データから画像を再構成するには全方向からの投影データを逆投影、つまり Radon 変換の逆変換を計算し、投影方向数で割ればよい。計算方法として、2次元フーリエ変換法、フィルタ補正逆投影法、重畳積分法があり、本実験では重畳積分法を使用した。重畳積分法は、画像のぼけを補正するためにフィルタ関数のインパルス応答  $h(r)$  を投影データにかけて、重畳積分を行ない、補正された投影データをつくる。このデータを逆投影して  $f(x,y)$  を再構成する。(1)

$$h(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-r_{max}}^{r_{max}} p(r, \theta) h(x \cos \theta + y \sin \theta - r) dr d\theta$$

### 3. 装置・方法

図2に実験体系を示す。

エネルギー 28MeV、電荷量 3.2nC/pulse、パルス幅 2ns の電子ビームを、両端を Ti 窓でふさぎ、中を水で満たした円筒形のガラス管の片端から入れる。そのとき、水中から放射されるチェレンコフ光をガラス管の側面からコリメータで取り込む。コリメータはファイバーにつながっており、光信号はファイバーを通して MCP-PMP Multi Channel Plate 付 Photo Multiplier、オシロスコープに入る。ガラス管の径は  $\phi 50\text{mm}$ 、長さ 175mm である。コリメータの径は  $\phi 46\text{mm}$  で、ファイバーの外径は  $\phi 200 \mu\text{m}$ 、長さ 10m である。また、光電子増倍管の電圧には -2kV を印加した。光放出 CT の場合、測定値そのものがコリメータの軸上の Radon 変換の積分値となるので、測定データが投影データになる。測定面は、ガラス管の軸に対して垂直で、ビームの入射から約 8cm の場所である。この測定面内で、ガラス管の周りでコリメータの位置を変化させ、さらに各位置で、コリメータの角度を変化させて測定したものが投影データになるのであるが、今回は、物体が回転対称なので実際の測定は投影方向は一方向、さらに投影データが中心から左右対称であるので、コリメータの角度変化も投影方向に垂直な角度を  $0^\circ$  として  $50^\circ \sim 90^\circ$  の片側の範囲についてのみ行なった。コリメータの角度変化

は図のようにミラーを使って行なった。回転ステージの軸に一辺 10mm の正方形のミラーを貼り、ミラーの角度を変化させ、測定方向の光を反射させてコリメータに入るようにする。ミラーを使うことで直接ガラス管 (X線の発生部分) を見込まないようにすることができ、X線のノイズを減らすことができる。

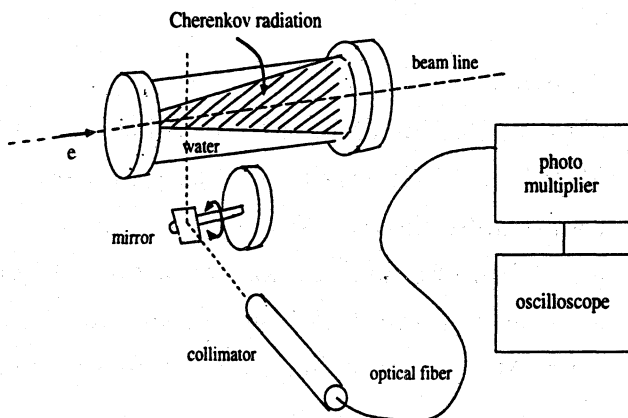


図2：実験体系

### 4. 結果

発光測定データの一例を図3に示す。ここでピーク値は、-12.16mV で、横軸目盛は 5ns/div である。コリメータの入口を紙でふさぎ、光をカットした時の X線の測定値が -3.48mV であるので、これを引いた -8.68mV が光のデータであると考えられる。

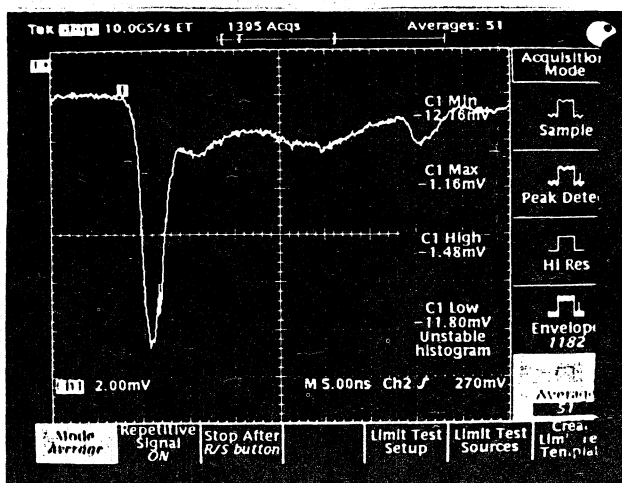


図3：発光測定データ

次に、測定データを補間してコリメータの角度変化範囲  $140^\circ$ 、サンプル数 29、サン

プル間隔  $5^\circ$ 、投影方向数 72 として CT の計算を行ない、水中のチェレンコフ光発光分布のピーク時の画像再構成した結果を図 4 に示す。図 1 での投影データは、s 軸の角度に平行な線で積分されているのに対し(平行ビーム投影)、実験では、s 軸を中心とし扇状に角度変化する線での積分値なので(ファンビーム投影)、他の投影方向から s 軸に平行となるデータを集めて平行ビーム投影にして計算している。計算は重畳積分法により、次式に示すような Shepp-Logan のフィルタ関数を使用し、インパルス応答  $h(ns)$  との畳み込み積分を行ない、補正投影データを用いた。

$$h(ns) = 2/\pi^2(\Delta r)^2(1 - 4n^2)$$

ここで、s はサンプル間隔である。

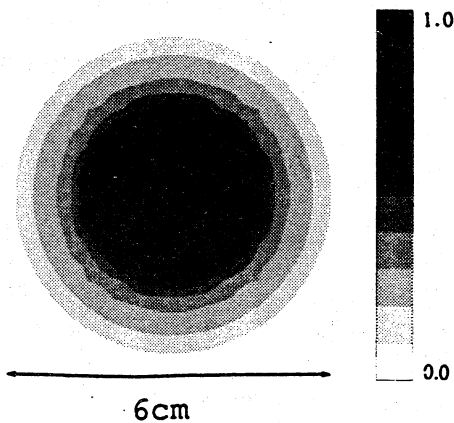


図 4：水中のチェレンコフ光の断面図の再構成画像

今回の実験では、ガラス管の断面の位置決めと、回転ステージの操作を手動で行ない測定したが、スキャンの位置決めと、スキャンを自動でできる図 5 のような装置を作製中である。スキャナーの構造は一軸ステージの上に自動回転ステージがのっており、回転ステージは投影方向を決めるものでコリメータとミラーがついている。ミラーはモーターで回転して 1 回転で 1 投影方向のスキャンを行なう。また、X 線を遮蔽するために鉛の円柱が物体を覆うようになっており、円柱には光を取り込む穴が開いている。この穴が常にコリメータの位置と合うように鉛円柱は回転する。この装置でさまざまな位置での断面の投影データが得られれば、それを画像再構成して発光の様子動画像が得

られる。光検出器も当初は光電子増倍管を使用し、ナノ秒の時間分解能であるが、その後ストリークカメラを導入し、ピコ秒、フェムト秒へと高時間分解能化をはかる予定である。また、空間分解能も向上させ、個体内部発光分布も測定できるようにする。

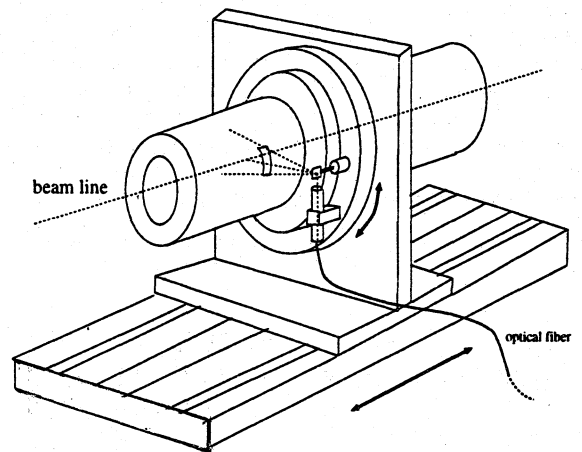


図 5：3次元自動測定装置

#### 5. まとめ

水で満たした円筒形のガラス管にライナックで発生した 28MeV 電子ビームを入射させ、水中からのチェレンコフ放射をミラーで反射させてコリメータに取り込み、ファイバーと光電子増倍管を使って測定した。測定したデータを投影データとして、光放出 CT の原理で計算し、画像を再構成した。再構成は重畳積分法で、フィルタ関数として Shepp-Logan の関数を用いた。今後は 3 次元自動測定装置とさらなる高時間分解能化、高空間分解能化をはかる。

#### 参考文献

- (1) 斉藤 恒雄 著：“画像処理アルゴリズム” 近代科学社