

## ELECTRON BUNCH ROTATION AND MEASUREMENT FOR EQUIVALENT VELOCITY SPECTROSCOPY

Takafumi Kondoh<sup>#</sup>, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida, Koichi Kan, Haruki Tanaka, Atsushi Ogata, Kimihiro Norizawa,  
and Seiichi Tagawa,

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,  
Mihogaoka 8-1, Ibaraki, Osaka, JAPAN, 567-0047

### Abstract

For achievement of femtosecond time resolution on the pulse radiolysis, a big problem of velocity difference between electron and light in a sample must be resolved. On equivalent velocity spectroscopy method which is devised for resolve this problem, incident analyzing light pulse must be slanted toward the electron beam with an angle associated with refractive index of sample. Then, to overlap light wave front and electron pulse, electron pulse must be rotated toward the direction of travel. The electron beam pulse could be rotated by changing the phase of RF in a linear accelerator. The rotation angle of the electron beam was measured by a femtosecond streak camera. Electron beam pulse was able to rotate until 60 degree. But the pulse width was also increased.

### 等価速度分光法パルスラジオリシスのための電子バンチ回転と計測

#### 1. 背景と目的

電子線が物質中に誘起する現象の初期過程を明らかにするために、フェムト秒 ( $10^{-15}$  秒) の時間分解能を持ったパルスラジオリシスを開発している。電子線パルスラジオリシスでは、電子線を物質に照射してラジカルイオンや励起状態などの活性種を生成し、遅延時間をもった分析光により時間分解吸収分光測定を行い電子線によって生成された中間活性種の反応過程を追跡する。ジェミネート再結合や水和電子などの準安定構造の形成は、とても速い時間領域の現象であると考えられている。これを研究するためにフェムト秒の時間分解能を実現するには、多くの問題を解決しなければならない。

フェムト秒の時間分解能を実現するためには、フェムト秒電子線パルスを発生し、フェムト秒パルス分析光を利用し、電子線と分析光の時間ジッターをフェムト秒ストリークカメラで補正し、試料中での電子線と光の速度差による時間分解能劣化の問題を解決する必要がある。

磁気パルス圧縮器を取り付けた、フォトカソード RF 電子銃 LINAC を最適化することにより、既に 98 fs (rms) の電子線パルスの発生に成功している [1]。分析光にはフェムト秒レーザーを用いているためフェムト秒の時間条件を満たしている。そこで、特に電子線と光の試料中での速度差による時間分解能劣化が問題となる。

屈折率  $n$  の試料中で光速は  $v_L=c/n$  となる。一方加速された電子線パルスは試料中でもほぼ光速に近い。このため、電子線と分析光が平行の配置では、

同時に入射しても、サンプルから出るまでに電子線パルスが先行する。その結果、サンプルの長さや屈折率に応じた時間分解能の劣化が生じる。

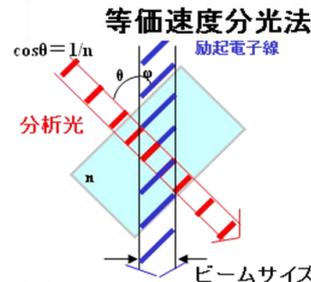


Fig.1 Scheme of the Equivalent velocity spectroscopy

この時間分解能劣化の問題を解決するために、Fig.1 に示した「等価速度分光法」と呼ぶ全く新しい手法を開発した。等価速度分光法では、試料中で分析光の速度と電子線の速度の分析光進行方向成分が等しくなるように角度  $\theta$  だけ斜めに入射する。 $\theta$  には、サンプルの屈折率を  $n$  として  $\theta = \arccos(1/n)$  の関係がある。電子線が通る距離を多くする事で、見かけ上の速度を等しくする。さらに電子線パルスの波面を制御し進行方向に対して傾いたパルスを入射させる。それにより、電子線と分析光の交差する領域で、光学遅延  $\tau=0\text{fs}$  のとき、分析光パルスと電子線パルスはぴったりと重なって進行し、その後別れる。等価速度分光法による時間分解能の向上は、電子線パルスと分析光パルスの重なる程度に依存する。このため、電子線パルスの波面の傾きを制御する必要がある。

<sup>#</sup>t-kondo@sanken.osaka-u.ac.jp

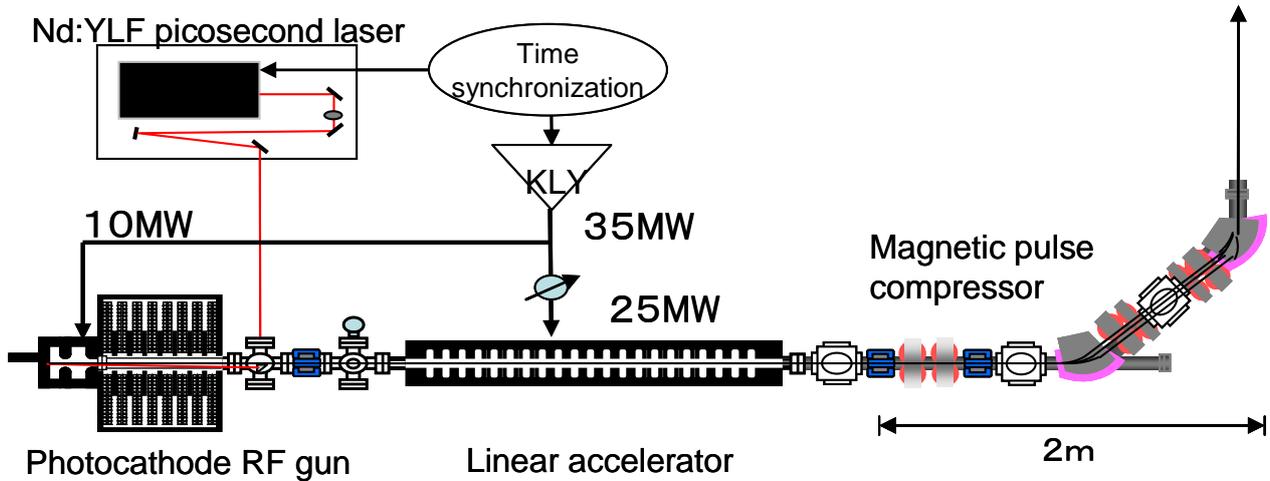


Fig.2 Photocathode RF Gun LINAC with magnetic bunch compressor.

そしてこのために、電子線パルス波面の回転角度を測定する必要がある。本研究では、等価速度分光法のための、電子線パルスの回転方法と、電子線パルス波面の角度の測定方法を開発し、電子線パルスの回転とその観測に成功したので報告する。

## 2. 実験装置

フェムト秒励起電子線パルスの発生には、Fig.2に示したように、フォトカソード RF 電子銃、S-band 進行波型加速管、磁気パルス圧縮器から構成される阪大産研フォトカソード RF 電子銃 LINAC を用いた。分析光には、同期させた Ti:Sapphire フェムト秒レーザーの基本波 (800nm) を用いた。分析光パルス幅は、電子ビームに同期したパルス列を切り出すために、パルスセクターを使用したので約 160fs であった。その他フォトカソード RF 電子銃 LINAC によるフェムト秒電子線パルスの発生やパルスラジオリシス測定系の詳細については別に報告されている[1]。

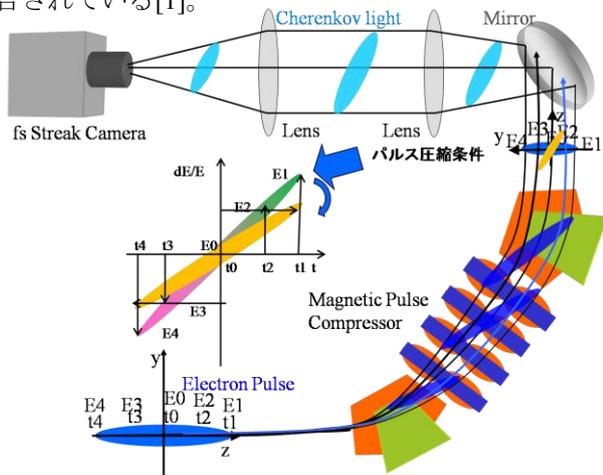


Fig.3 Electron bunch rotation and measurement by streak camera

電子パルス波面の回転方法と、その測定方法を Fig.3 に示す。線形加速管の RF 位相をパルス圧縮の条件から変化させて、縦方向位相空間内でのバンチの傾きを小さくすることにより、パルス圧縮の条件に対してエネルギー変調した。これにより通過するパスが変わるために、電子バンチ内での電子線パルスの波面が回転する。電子線パルスは空気中でチェレンコフ光を発生し、サンプル位置でのチェレンコフパルス光像をフェムト秒ストリークカメラ (FESCA-200:浜松ホトニクス) に転送した。ストリークカメラ像上で、横軸はスリットの長軸、縦軸に時間軸を取ると、電子線パルスの回転角度は、以下の Fig.4 に示した式で求められた。

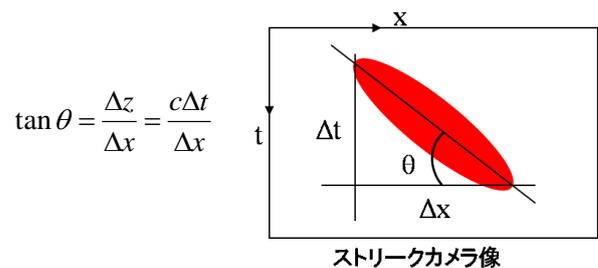


Fig.4 Rotation angle estimation by streak images of electron bunch

## 3. 実験結果

Fig.5 に加速管の RF 位相を変化させた時のストリークカメラ像を示した。横軸がスリット長軸で、縦軸は時間軸を示している。中段がパルス圧縮の条件のときの電子バンチ像である。パルス幅が小さく、傾きもない。加速管 RF の位相を変化させるにつれて、パルスの回転角度は大きくなり、67 度まで回転することができた。しかし、パルス幅方向には大きく広がってしまった。

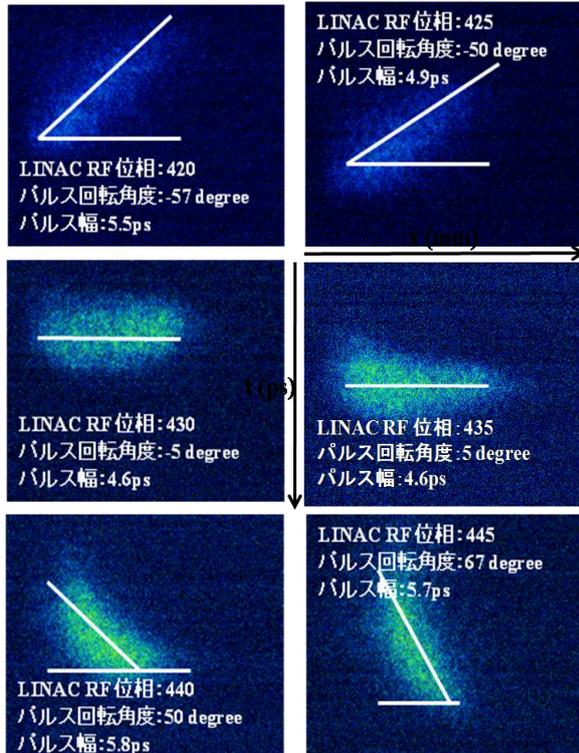


Fig.5 Streak camera images of rotated bunch by changing phase

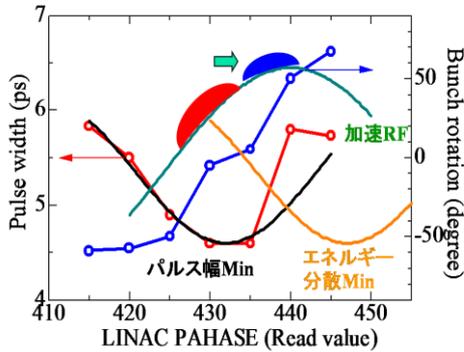


Fig.6 Electron-bunch rotation by energy modulation at linear accelerator

Fig.6 に線形加速管中の加速位相に対するパルス幅とバンチ回転角度を示した。赤色で示した位相位置で、パルス幅は最小になり、回転角度が 0 度になる。そこから少し加速位相のずれた青色の位相では、パルス圧縮の条件からずれて、パルス幅が約 5.5 ps と広がり、回転角度は 50 度となった。

電子線パルス波面の回転角度とパルス幅の同時計測方法を確立した。線形加速管でのエネルギー変調により電子パルス波面を回転できた。

#### 4. まとめ

フェムト秒電子線パルスラジオリシスを開発している。フェムト秒の時間分解能を実現するために、いくつかの要素技術を開発している。物質中での電子と光の速度差に起因した時間分解能の劣化問題を解決するために、等価速度分光法を提案している。等価速度分光法では、電子線とレーザーを斜めに入射し、電子線パルス波面を回転させて、重なるように制御する。チェレンコフ光をストリークカメラで測定する電子パルス波面の測定方法を提案した。加速管での高周波位相を変化させることにより、電子バンチをパルス圧縮条件からエネルギー変調し、電子バンチ波面を回転させた。ストリークカメラにより回転角度を測定した結果、ある位相でパルス幅は最少となり、その前後の加速移送に変化させることにより、電子バンチの位相空間分布のエネルギーの傾きを変調して電子バンチを回転させることができた。

#### 参考文献

- [1] J. Yang, T. Kondoh, K. Kan, T. Kozawa, Y. Yoshida, S. Tagawa, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 556(2006)52-5
- [2] J. Yang, et al., Radiat. Phys. Chem., 75(2006) 1034-1040